

Trabajo Final de Máster

Máster Universitario en Ingeniería de Automoción

Diseño, análisis y fabricación del soporte *Front Wing* y conjunto *Front Wing* del CAT13e

MEMORIA

Autor: Baker i Iguaz, Ricard
Director: Roure Fernández, Francisco
Convocatoria: Junio 2020



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



RESUMEN

Durante la temporada 2018/2019 se diseñó un monoplaza *Formula Student* que técnicamente se consideró el más avanzado de la historia del equipo. Se implementaron muchas mejoras y cambios que a su vez introdujeron nuevos problemas y retos que el equipo tuvo que afrontar.

Con el objetivo de mejorar el flujo del aire y el rendimiento del monoplaza CAT12e se rediseñó el soporte del conjunto *front wing*. El nuevo diseño y posicionamiento del soporte era favorable para el comportamiento aerodinámico del monoplaza pero creaba conflictos con el nuevo atenuador de impactos que se quería instalar en el monoplaza CAT13e.

En la temporada 2019/2020 la intención era usar el mismo molde para fabricar el monocasco que la temporada anterior, con lo que no podría haber cambios significativos respecto a la geometría del monocasco.

Para poder implementar un nuevo diseño de atenuador de impactos, respetar la normativa impuesta por la competición *Formula Student Germany* y mantener una geometría de monocasco y *front wing* se tendría que rediseñar el soporte del conjunto *front wing*.

En este trabajo se documenta el proceso de diseñar un soporte de *front wing* que cumpla con la normativa, soporte los requisitos mecánicos generados por la carga aerodinámica y que el peso del soporte sea el mínimo posible. Además se analizará la estructura del conjunto *front wing* para garantizar que también soportará los requisitos mecánicos generados durante el uso del monoplaza durante la temporada 2019/2020.

Para ello se utilizarán varios programas de diseño y simulación para poder encontrar el compromiso entre todos los objetivos anteriormente expuestos.

Por desgracia la temporada del CAT13e se ha visto cancelada debido a la pandemia mundial del COVID 19 pero el diseño y aprendizaje del proceso de diseño del soporte se trasladarán a los futuros miembros del equipo que lo podrán usar para diseñar futuras mejoras en los futuros monoplazas.

1. SUMARIO

RESUMEN	3
1. SUMARIO	4
2. GLOSARIO	7
3. Listado de imágenes, tablas y gráficos	8
4. Prefacio	12
4.1. Origen del proyecto.....	12
4.2. ¿Qué es la Formula Student?.....	12
4.3. Normativa y requisitos.....	14
4.4. Motivación.....	15
5. Introducción	16
5.1. Objetivos del proyecto	16
5.2. Alcance del proyecto.....	17
6. METODOLOGÍA DE DISEÑO	18
6.1. SolidWorks 2017	19
6.2. Altair	19
6.2.1. Hypermesh	19
6.2.2. Optistruct.....	19
6.2.3. Hyperview.....	19
7. CONJUNTO FRONT WING	20
7.1. Normativa elementos aerodinámicos.....	21
7.1.1. Restricciones geométricas.....	21
7.1.2. Restricciones estructurales.....	23
7.2. Diseño Front Wing.....	24
7.2.1. Main wing	24
7.2.2. Flaps.....	25
7.2.3. Endplate	26

7.3. Fabricación <i>Front Wing</i>	27
7.3.1. Moldes fibra de vidrio.....	29
7.3.2. Piezas de fibra de carbono prepreg.....	31
7.3.3. Piezas de fibra de carbono seca.....	33
7.3.4. Ensamblaje del <i>front wing</i>	34
8. DISEÑO SOPORTE FRONT WING	36
8.1. Historia	36
8.2. Puntos y métodos de anclaje.....	38
8.2.1. ¿Qué es un inserto y dónde se encuentran?	38
8.2.2. Métodos de anclaje.....	40
8.2.3. Sujeción con los componentes U	41
8.2.4. Puntos y método de sujeción con el monocasco.....	42
8.3. Geometría.....	45
8.4. Material usado.....	45
8.5. Fabricación Soporte.....	46
9. SIMULACIÓN	47
9.1. MODELO	47
9.2. MALLADO	48
9.3. Superficies de contacto	52
9.4. Condiciones de contorno.....	55
9.5. Materiales usados	56
9.6. Fuerzas ensayadas.....	56
9.7. Resultados	58
9.7.1. Desplazamientos.....	59
9.7.2. Tensiones	61
10.OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DEL SOPORTE	63
10.1.Objetivos	63

10.2.Simplificación modelo	63
10.3.Restricciones.....	66
10.4.Resultados	67
11.REDISEÑO SOPORTE	68
11.1.Geometría.....	68
11.2.Análisis modelo optimizado	69
11.2.1. Desplazamientos.....	69
11.2.2. Tensiones	71
11.3.Reducción de peso	74
12.SOFTWARE Y HARDWARE USADO	75
13.FUTURAS MEJORAS	76
13.1.Materiales compuestos.....	76
13.2.Geometría.....	77
13.3.Fabricación aditiva	78
14.IMPACTO MEDIOAMBIENTAL	79
15.ANÁLISIS DE LOS COSTES	82
15.1.Coste material	82
15.2.Coste humano/diseño.....	83
15.3.Coste total.....	84
16.Planificación	85
CONCLUSIONES	87
AGRADECIMIENTOS	88
BIBLIOGRAFÍA	89
Referencias Bibliográficas.....	89
BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA	89
ANEXOS	

2. GLOSARIO

Honeycomb: Núcleo con patrón hexagonal (en forma de panal de abeja)

Front Wing: Alerón delantero

Monolítico: Laminado hecho exclusivamente de fibra de carbono.

CAD: Computer Aided Design

FSG: Formula Student Germany

Twill: Fibra de carbono bidireccional, con entrelazado tipo sarga

UD: Fibra de carbono unidireccional

Prepreg: Fibra de carbono pre-impregnada con resina epoxy

Nose: Componente frontal del vehículo que cubre el atenuador de impactos

IAD: Impact Attenuator Document

Drag Resistance: Resistencia de un objeto en un medio fluido

Downforce: Fuerza vertical descendente que genera carga sobre el monoplaza

Body: Departamento de chasis y materiales compuestos

3. Listado de imágenes, tablas y gráficos

Tabla 4-1 : Puntuación eventos dinámicos y estáticos.....	13
Imagen 4-1: Patrocinadores competición fsg.....	14
Gráfico 6-1: Proceso de diseño del soporte.....	18
Imagen 7-1: Package aerodinámico	20
Imagen 7-2: Restricción geométrica normativa fsg.....	21
Imagen 7-3: Restricción de zona de los elementos aerodinámicos	22
Imagen 7-4: Conjunto front wing	24
Imagen 7-5: Zonas main wing	25
Imagen 7-6: Extremo main wing	25
imagen 7-7: Flaps main wing.....	26
Imagen 7-8: Endplate.....	26
Imagen 7-9: fibra de carbono prepreg (izquierda) y seca (derecha)	27
Imagen 7-10: Rohacell 51 (izquierda) y nomex (derecha).....	28
Imagen 7-9: Modelo de madera mdf	30
Imagen 7-10: Moldes con gelcoat y polvo de aluminio	30
Imagen 7-11: Cortes de fibra de vidrio	30
Imagen 7-12: Sellando bolsa de vacío con taky tape.....	30
Imagen 7-13: Modelos con fibra de.....	30
vidrio infundada con resina	30
Imagen 7-14: Moldes en autoclave.....	30
Imagen 7-15: Fibra laminada con capa de Peel ply	32
Imagen 7-16: Fibra con sidetech	32
Imagen 7-17:Primera capa de fibra de carbono	32
Imagen 7-18: Vista lateral del main wing	32
Imagen 7-19: deflector fabricado con impresión 3d.....	35
Imagen 7-20: conjunto front wing.....	35
antes de pulir	35
Imagen 7-21: conjunto front wing con pegatinas patrocinadores	35
Imagen 7-22: conjunto front wing con.....	35
pegatinas de colores del equipo.....	35

Imagen 8-1: CAT10e con soporte de barras rígidas	36
Imagen 8-2: Cat11e con soporte en el lateral.....	36
Imagen 8-3: Soporte front wing Cat12e	37
Imagen 8-4: Dummy IA assembly	38
Imagen 8-5: Configuración de panel sandwich	39
Imagen 8-6: Inserto.....	39
Imagen 8-7: Inserto relleno con aramida	40
Imagen 8-8: Componentes en forma de U del front wing	41
Imagen 8-9: Zona delantera inferior del monocasco	42
Imagen 8-10: Insertos y conjunto pedales en la parte delantera del monocasco... 43	
Imagen 8-11: Vista sección método de ajuste con el monocasco	44
Imagen 8-12: Modelo soporte inicial	45
Imagen 9-1: Modelo HyperMesh del conjunto front wing	47
Imagen 9-2: Modelo con soporte (verde) y monocasco (naranja) con tornillos y tuercas	48
Imagen 9-3: Componentes mallados usando elementos 3D	49
Imagen 9-4: Modelo simplificado para realizar el primer análisis.....	50
Imagen 9-5: Soporte mallado con elementos 3D Mixed	51
Imagen 9-6: Superficies malladas con elementos tipo shell	51
Imagen 9-7: Elementos creados con la superficie de contacto	52
Imagen 9-8: Superficies de contacto del núcleo de Rohacell 51	53
Imagen 9-9: Superficies de contacto de los tornillos	54
Imagen 9-10: Superficie de contacto en el centro del tornillo.....	54
Imagen 9-11: Desplazamiento (izquierda) y tensión (derecha) del tornillo M5	55
Imagen 9-12: Nodos del modelo fijos en los 6 grados de libertad.....	55
Tabla 9-1: Propiedades de los materiales usados	56
Imagen 9-13: Carga de 200 N aplicada verticalmente	57
Imagen 9-14: Carga de 200 N aplicada transversalmente	57
Imagen 9-15: Carga de 50 N aplicada verticalmente	58
Imagen 9-16: 1200 N verticales repartidos nodalmente por el main flap	58
Tabla 9-2: Desplazamientos máximos de las varias cargas ensayadas	59
Imagen 9-17: Desplazamiento del conjunto simplificado (1200 N verticales)	59
Imagen 9-18: Desplazamiento del conjunto simplificado (200 N verticales)	60

Imagen 9-19: Desplazamiento del conjunto simplificado (200 N transversales) .60	60
Imagen 9-20: Desplazamiento del conjunto simplificado (50 N verticales)60	60
Tabla 9-3: Máximas tensiones de las varias cargas ensayadas61	61
Imagen 9-21: Tensión Von Mises (1200 N verticales)61	61
Imagen 9-22: Tensión von mises (200 N transversales).....62	62
Imagen 9-23: Tensión von mises (200 N verticales).....62	62
Imagen 10-1: Modelo simplificado para la optimización con carga de 1200N ...64	64
Imagen 10-2: Desplazamiento modelo simplificado 1 (izquierda) y modelo simplificado para la optimización topológica (derecha).....64	64
Imagen 10-3: Tensión modelo optimización (1200 N verticales)65	65
Imagen 10-4: Vista lateral de la tensión modelo simplificado (1200 N verticales)...	65
Imagen 10-5: Vista lateral de la tensión modelo simplificado para la optimización topológica (1200 N verticales)65	65
Imagen 10-6: Nodos seleccionados para la restricción de desplazamiento del soporte durante la optimización topológica66	66
Imagen 10-7: Optimización topológica del soporte con densidad de elemento de 0,2567	67
Imagen 11-1: Modelo CAD del soporte optimizado68	68
Tabla 11-1: Desplazamientos máximos del conjunto con soporte optimizado ...69	69
Imagen 11-2: Desplazamiento del conjunto (1200 N verticales)69	69
Imagen 11-3: desplazamiento 200 vertical70	70
Imagen 11-4: Desplazamiento 200 transversal.....70	70
Imagen 11-5: Desplazamiento 50 vertical.....70	70
Tabla 11-2: Tensiones máximas del soporte.....71	71
Imagen 11-6: Tensión soporte optimizado (1200 N verticales).....71	71
Imagen 11-7:Tensión soporte optimizado (200 N verticales).....72	72
Imagen 11-8: Tensión soporte optimizado (200 N transversales).....72	72
Imagen 11-9: Tensión soporte optimizado (50 N verticales).....72	72
Imagen 11-10: Tensión en el conjunto front wing (izquierda) y tensión en la piel del conjunto front wing (derecha)73	73
Imagen 11-11: Tensiones en los componentes U (carga de 1200 N verticales) ..73	73
Imagen 11-12: Tensión 200 N verticales (izquierda) y 200 N transversales (derecha) en el conjunto front wing.....73	73
Imagen 11-13: Tensión 200 N verticales (izquierda) y 200 N transversales (derecha) en los componentes U74	74

Tabla 11-3: Reducción de peso del soporte optimizado	74
Imagen 13-1: Monocasco fibra de.....	76
carbono de un Formula 1	76
Imagen 13-2: Posible rediseño soporte con sección L	78
Gráfico 14-1: Energía usada en varios materiales de fabricación [3]	80
Gráfico 14-2: Energía consumida para el primer y segundo uso del aluminio [4] ...	81
Diagrama 16-1: Diagrama de Gantt con fechas aproximadas para el proceso de diseño y fabricación del soporte del conjunto front wing	86

4. Prefacio

4.1. Origen del proyecto

Este trabajo se ha desarrollado dentro del equipo ETSEIB Motorsport, el equipo de Formula Student motorsport electric de la ETSEIB (UPC), durante la temporada 2019/2020 con el monoplaza CAT13e.

El equipo se divide en varios departamentos (Aerodinámica, Body, Control, Dinámica, Electrónica, Gestión y Powertrain) que trabajan conjuntamente para el diseño y fabricación del monoplaza.

4.2. ¿Qué es la Formula Student?

La Formula Student es una competición de motorsport a nivel mundial que introduce a estudiantes de ingeniería al mundo del motorsport. En esta competición hay tres categorías: *combustion*, *electric* y *driverless* aunque se prevé que en un futuro la categoría de combustión desaparezca y que las categorías *driverless* y *electric* se unifiquen.

La desaparición de la categoría *combustion* se debe a la naturaleza de la competición que tiene una visión de futuro que refleja con la visión de futuro de un método de transporte totalmente eléctrico.

Los equipos de formula student deben estar formados por estudiantes de la universidad. Sin la ayuda directa de profesionales del sector de la automoción tiene que diseñar, simular, ensayar y construir un pequeño monoplaza estilo Formula 1 siguiendo una estricta normativa que cada año va evolucionando. La normativa tiene como objetivo garantizar la seguridad de todos los miembros del equipo manejando el monoplaza así como la seguridad del piloto y jueces durante las competiciones.

En las competiciones el objetivo no es únicamente tener el vehículo más rápido, sino que también se valora el diseño constructivo, rendimiento, venta y marketing, financiación y presentación de todo el proyecto.

Para ello la competición está dividida en varias pruebas estáticas y dinámicas con diferentes puntuaciones (Tabla 4-1)

Event	until 2020	2021 onwards
Business Plan Presentation	75	50
Cost and Manufacturing	100	100
Engineering Design	150	150
Acceleration	75	50 with driver 75 driverless
Skid Pad	75	50 with driver 100 driverless
Autocross	100	100
Endurance	325	250
Efficiency	100	75
Total	1.000	1.000

TABLA 4-1 : PUNTUACIÓN EVENTOS DINÁMICOS Y ESTÁTICOS

Se puede observar que la puntuación de los eventos estáticos equivalen a un 32,5% de la puntuación total de 1.000 puntos. En la prueba estática de *Engineering Design* los equipos presentan el monoplaza desde un punto de vista técnico a especialistas del sector de la automoción y defienden los diseños del monoplaza.

Existen varias pruebas dinámicas aunque la prueba estrella es la *Endurance*, donde se tiene que completar un circuito múltiples veces hasta completar 22 Km sin recargar la batería.

Antes de poder competir en cualquier evento dinámico hay que completar y tener aprobados todos los documentos de seguridad que se generan meses en antelación y superar una preinspección exhaustiva. Además los monoplazas serán inspeccionados nuevamente después de los eventos dinámicos para garantizar que no se ha incumplido ninguna norma.

Las competiciones europeas de Formula Student, a diferencia de las competiciones de Formula 1, se realizan todas durante el verano dejando así todo el curso académico para poder diseñar, simular, construir y ensayar el monoplaza.

El equipo ETSEIB Motorsport ha tenido el privilegio de tener el soporte de la universidad, empresas y particulares para poder desarrollar este proyecto. Se tiene que destacar que este proyecto trabaja con tecnologías, materiales y procesos punteros de ingeniería y que sería casi imposible poder fabricar este vehículo sin el soporte de la universidad, patrocinadores y empresas.

Es una oportunidad única para los estudiantes para aprender métodos ingenieriles, tener un primer contacto con el motorsport y sobretodo establecer una relación con todas las empresas que ayudan al desarrollo del proyecto.

Las aptitudes y ética de trabajo que se aprende durante los dos años preparan de forma única a los futuros ingenieros para el mundo profesional. Solamente se tiene que observar todas las empresas que apoyan a esta competición para entender que estas empresas apuestan por estos futuros ingenieros.



IMAGEN 4-1: PATROCINADORES COMPETICIÓN FSG

El compromiso de formar parte del equipo ETSEIB Motorsport es de jornada completa y el estudiante tiene que organizarse para poder cumplir con sus estudios académicos simultáneamente.

4.3. Normativa y requisitos

La normativa que acata el equipo ETSEIB Motorsport se trata de la normativa redactada por la competición *Formula Student Germany* [1]. Esto se debe a que la competición alemana es la más prestigiosa y casi todas las otras competiciones siguen la normativa alemana.

En esta normativa se pueden encontrar especificados desde los tornillos que se pueden usar hasta el comportamiento de los miembros durante las competiciones. Al fin y al cabo la Formula Student es una competición mundial de gran importancia y se debe mantener un nivel de profesionalidad elevado.

Hay varios puntos importantes dentro de la normativa que limitan la potencia máxima que se puede extraer del conjunto de baterías. También hay documentos que establecen los requisitos mínimos para garantizar la seguridad del piloto y el correcto diseño de todos los componentes del monoplaça.

Con estos limitantes el método para mejorar la relación peso/potencia es reduciendo el peso de todos los componentes posibles garantizando que sigan cumpliendo los requisitos de la competición establecidos en la normativa.

Para mejorar el comportamiento dinámico del monoplaça se desarrollan sistemas de control, percepción, diseño de suspensión y dirección y un paquete aerodinámico.

El departamento de *Body* se encarga de diseñar el chasis y los soportes para que todos los otros componentes puedan instalarse en el monoplaza. También se encargan de los componentes ergonómicos como el asiento y el volante.

Diseñar el chasis es una tarea que requiere la cooperación de todos los departamentos y el uso del software de diseño *SolidWorks*. Coordinando semanalmente el diseño usando el formato de "*Package*" se puede controlar el progreso del equipo. Semanalmente se actualiza el *Package* y se incorporan los cambios de los diferentes componentes desarrollados por los distintos departamentos garantizando que no interfieran entre ellos y de que cumplan la normativa.

Para la realización del componente de soporte del *front wing* se han tenido que seguir los requerimientos establecidos en varios puntos de la normativa así como los limitantes de diseño establecidos debido a la reutilización de los moldes de fabricación de la temporada anterior.

4.4. Motivación

Con tal de reducir el peso del conjunto atenuador de impactos y cumplir con los requisitos impuestos por la normativa de *Formula Student Germany* es necesario un rediseño del soporte del conjunto *front wing*.

El conjunto *front wing* está diseñado para aportar *downforce* al monoplaza y redirigir el flujo de aire alrededor del monoplaza para minimizar el coeficiente de *drag resistance*. La fuerza de *drag* es contraria al desplazamiento del monoplaza y reduce la aceleración y velocidad del monoplaza.

Además de tener que cumplir con la normativa hay un grado de complicación añadido debido a que los moldes de fabricación se reutilizarán de la temporada anterior. Esto significa que la geometría del monocasco y del *front wing* son fijos y no se pueden modificar.

Así que el conjunto *front wing* y el nuevo soporte tienen que adaptarse a la disposición del monoplaza CAT12e y estar optimizados para reducir el peso mejorando así las prestaciones del monoplaza.

5. Introducción

5.1. Objetivos del proyecto

El objetivo principal del proyecto es diseñar un soporte para el conjunto de *front wing* que cumpla con la normativa establecida por la competición *Formula Student Germany*.

También se quiere realizar un análisis estructural del conjunto *front wing* y el soporte para garantizar que el conjunto resistirá los esfuerzos mecánicos producidos por la carga aerodinámica.

Además de rediseñar el soporte para que cumpla con la normativa y permita la incorporación de un nuevo atenuador de impactos se quiere reducir el peso del soporte para mejorar las prestaciones del monoplace.

Para cumplir con los objetivos se quieren usar programas de diseño usados en la industria de la automoción como los programas de diseño asistidos por ordenador (CAD) y programas de análisis estructural por elementos finitos (FEM). Para ser más específicos se pretende usar el programa de diseño CAD *SolidWorks 2017* y el programa FEM *Altair HyperWorks* para analizar el comportamiento mecánico y optimizar la pieza.

Se pretende, en la medida de lo posible, planificar el diseño, fabricación y ensayo de los componentes cumpliendo con las fechas establecidas para tener el monoplace CAT13e listo para ser ensayado. Éste apartado se ha visto altamente afectado por la pandemia mundial del COVID 19 pero se simulará con una temporada que no se haya visto afectada.

El objetivo del equipo es mejorar continuamente y transmitir los conocimientos de los miembros actuales para futuros miembros del equipo. Para ello se pretende documentar el proceso de diseño, centrándose en el estudio mecánico y el proceso de optimización del soporte del conjunto *front wing*.

Finalmente con la documentación del proceso de diseño y fabricación se podrá presentar en el evento de *Design* durante las futuras competiciones para obtener una mejor puntuación en las competiciones.

5.2. Alcance del proyecto

En este trabajo se considera el estudio mecánico de todo el conjunto *front wing* y la optimización del soporte del conjunto *front wing*.

El estudio mecánico del ensamblaje completo se realizará teniendo en cuenta las fuerzas de ensayo establecidas en la normativa y las fuerzas generadas por la carga aerodinámica en el caso de máxima carga vertical.

La optimización del soporte se adaptará a los puntos de anclaje predeterminados por el diseño del monoplaza de la temporada pasada y por el espacio disponible para posicionar el soporte teniendo en cuenta el flujo de aire a través del *front wing* y el fondo plano.

No se realizará un análisis mecánico en detalle de las uniones del soporte con el monocasco ni con el *front wing*. Las arandelas, tuercas, tornillos y otros componentes de sujeción no serán optimizados pero se realizará un estudio mediante FEM para simular la pretensión de los tornillos.

Se explicará el proceso de fabricación y diseño del *front wing* y el soporte así como la normativa que tienen que cumplir.

Finalmente se tendrá en cuenta el coste monetario y medioambiental del conjunto y posibles mejoras para futuros diseños del soporte.

6. METODOLOGÍA DE DISEÑO

Para realizar el proceso de diseño y simulación primero se diseña la pieza usando el software CAD *SolidWorks* y luego se importa al software de FEM *HyperWorks* donde se prepara el modelo para realizar un análisis estructural.

Usando el post procesador *HyperView* se analizan los resultados obtenidos en la pieza para comprobar que sean satisfactorios. Si los resultados obtenidos son satisfactorios se realiza una optimización topológica para reducir el peso total. En caso de que el primer modelo no sea satisfactorio, se rediseña el componente usando el software CAD *SolidWorks* y se vuelve a analizar usando el programa FEM.

Una vez obtenidos los resultados de la optimización topológica se puede rediseñar la pieza usando el software de diseño CAD *SolidWorks* e importar nuevamente la pieza a *HyperMesh* para realizar un análisis estructural de la nueva pieza.

Finalmente se analizan los resultados obtenidos con el post procesador *HyperView* para comprobar que el nuevo diseño de la pieza sea correcto.

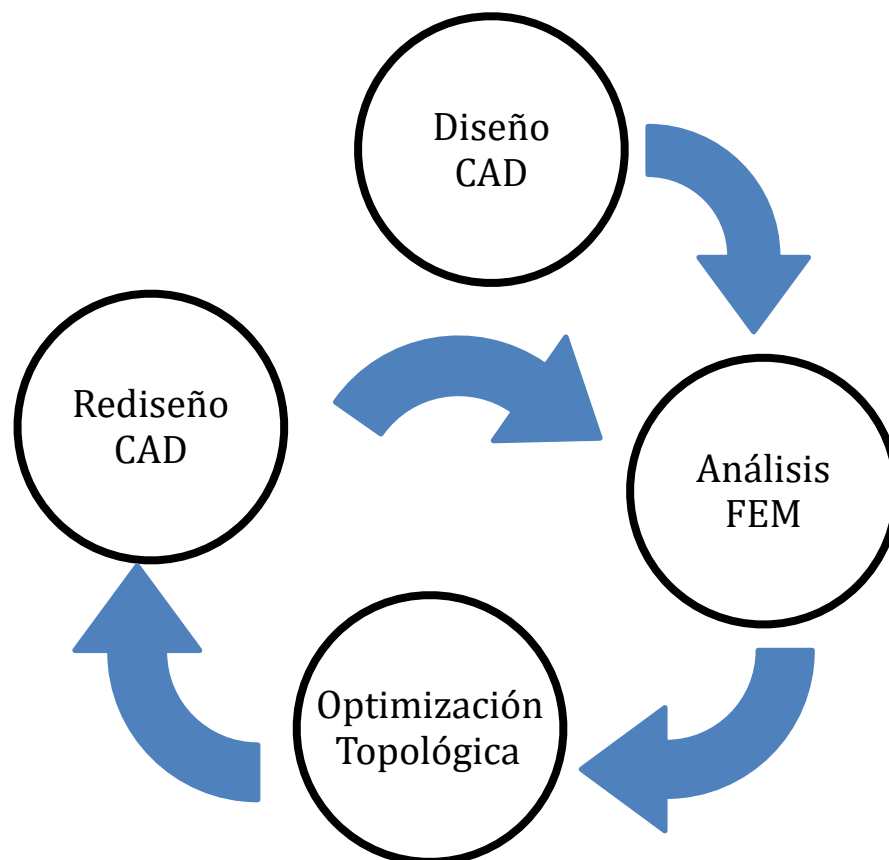


GRÁFICO 6-1: PROCESO DE DISEÑO DEL SOPORTE

6.1. SolidWorks 2017

Una de las grandes ventajas de usar el programa de diseño CAD *SolidWorks* 2017 es que permite una gran libertad de diseño. Además permite el trabajo cooperativo de varios usuarios con un mismo ensamblaje y facilita la identificación de componentes que tengan posicionamientos conflictivos.

Poder identificar componentes que generan conflictos en el diseño permite reducir el coste total de l proyecto.

Además este software CAD permite el cálculo de parámetros físicos de los componentes y permite exportar los diseños a programas de análisis estructural y muchos otros.

6.2. Altair

La compañía *Altair* patrocina al equipo ETSEIB Motorsport con programas de simulación que se usan para diseñar y analizar componentes del monoplaza.

6.2.1. Hypermesh

El programa *HyperMesh* permite importar diseños creados con *SolidWorks* y preparar el modelo para su análisis.

Para preparar el modelo para su análisis se tiene que mallar el modelo, crear condiciones de contorno, crear las cargas para el análisis, definir los materiales usados y definir las interacciones entre los componentes del modelo.

6.2.2. Optistruct

Optistruct es el programa usado para procesar el modelo creado usando *HyperMesh*. En este estudio la potencia computacional ha estado limitada por el hardware usado y se ha tenido que simplificar el modelo para poder optimizar el componente.

6.2.3. Hyperview

Después de procesar el componente usando *Optistruct* se pueden analizar los resultados usando el post-procesador *HyperView*.

De un modo claro se pueden observar varios parámetros como la deformación de la pieza, los esfuerzos mecánicos generados en los componentes, la densidad de elementos en el cálculo de optimización topológica y muchos otros resultados.

7. CONJUNTO FRONT WING

El paquete aerodinámico del monoplaza CAT13e tiene como principal objetivo mejorar el comportamiento del vehículo durante los eventos dinámicos así como facilitar la refrigeración de los componentes que lo necesiten.

El paquete aerodinámico de la temporada 2018/2019 estaba formado por los siguientes componentes que se pueden observar en la Imagen 7-1. Cada componente es responsable de redirigir el flujo de aire para incrementar el *downforce* y así aumentar el agarre del vehículo.

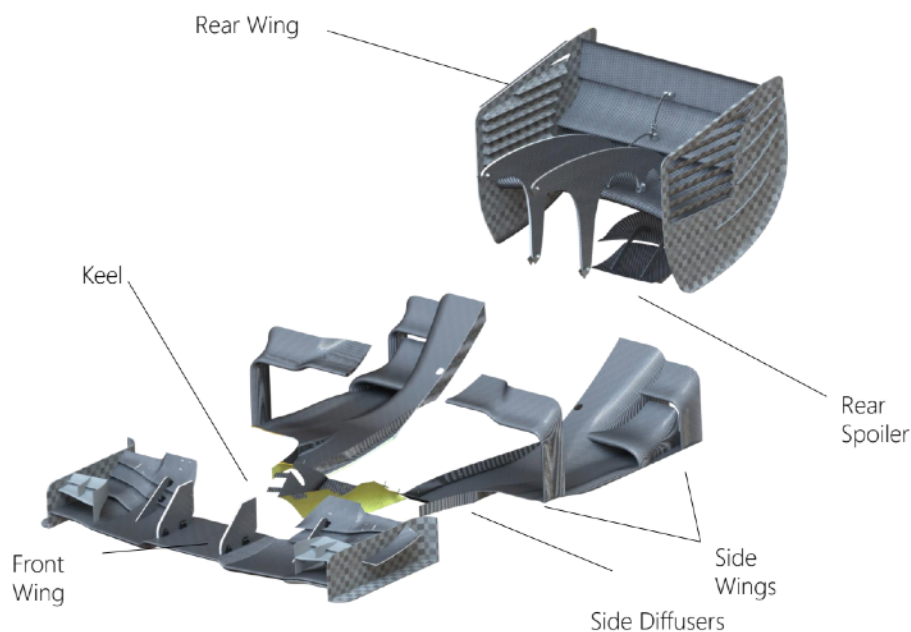


IMAGEN 7-1: PACKAGE AERODINÁMICO

Los distintos componentes del conjunto *front wing* se describen a continuación en el apartado 7.2.

7.1. Normativa elementos aerodinámicos

Las restricciones presentadas a continuación hacen referencia a los elementos aerodinámicos según la normativa de la competición FSG. En el apartado *T.8 Aerodynamic Devices* se describe como elemento aerodinámico cualquier estructura que esté diseñada específicamente para aumentar el *downforce* o disminuir el *drag*. Se excluyen los soportes de los elementos aerodinámicos a no ser que estén diseñados con el objetivo de mejorar las características aerodinámicas.

Teniendo en cuenta la seguridad, apartado *T.8.3 Minimum Edge Radii of Aerodynamic Devices*, se determina que todo elemento que pueda contactar con un peatón debe tener un mínimo radio horizontal de 5 mm y un radio vertical de 3 mm.

7.1.1. Restricciones geométricas

Las restricciones geométricas para los elementos aerodinámicos del monoplaza están explicadas en varios puntos de la normativa.

T.2.1 Vehicle Configuration (Imagen 7-2)

1. El ensamblaje de las rueda/neumático no puede estar obstaculizado desde la vista lateral.
2. Hay una zona llamada *keep-out-zone*, delimitada con dos líneas verticales que se encuentran 75 mm por delante y atrás del diámetro exterior de la rueda/neumático, donde no puede haber ningún componente del monoplaza. Ésta zona se extiende lateralmente desde el plano de la superficie exterior de la rueda/neumático hasta el plano de la superficie interior de la rueda/neumático.

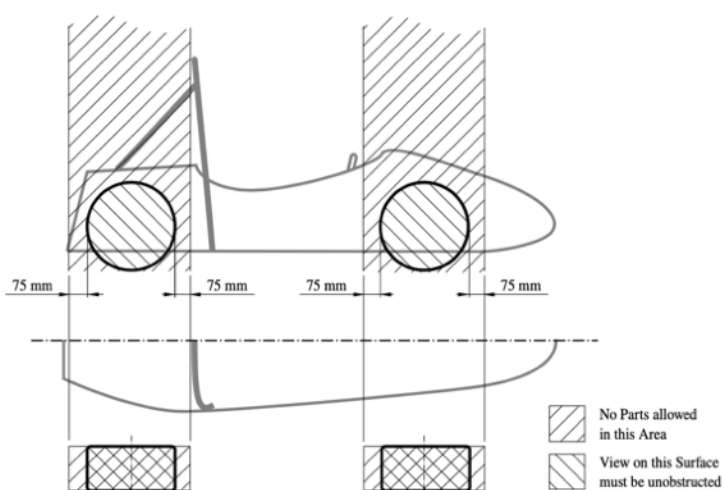


IMAGEN 7-2: RESTRICCIÓN GEOMÉTRICA NORMATIVA FSG

T.8.2 Restrictions for Aerodynamic Devices (Imagen 7-3)

Todas las restricciones deben cumplirse con las ruedas/neumáticos en dirección frontal, con cualquier configuración de la suspensión y con o sin piloto a bordo. A continuación se expondrán los puntos de la normativa que afectan al diseño del *front wing*.

1. Restricción en altura

1. Todos los elementos aerodinámicos que se encuentran por delante del plano vertical creado por la superficie posterior del reposacabezas tienen que estar a menos de 500 *mm* del suelo.
2. Todos los elementos aerodinámicos que se encuentran por delante del eje delantero y por el interior del plano vertical generado por la parte interior de la rueda/neumático delantera tienen que estar a menos de 250 *mm* del suelo.

2. Restricción en longitud

1. Todo elemento aerodinámico no debe extenderse más de 700 *mm* desde el punto delantero de la rueda/neumático delantero.

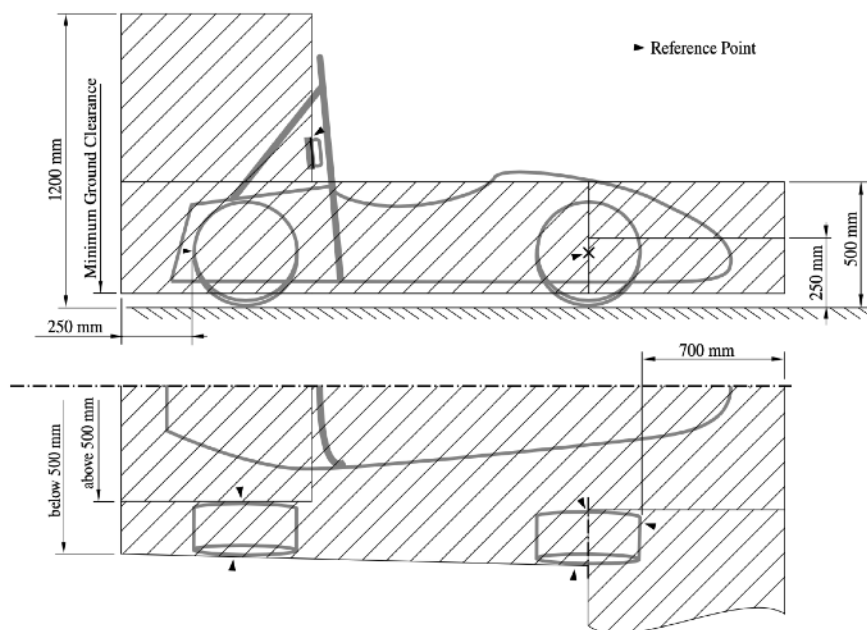


IMAGEN 7-3: RESTRICCIÓN DE ZONA DE LOS ELEMENTOS AERODINÁMICOS

7.1.2. Restricciones estructurales

Para garantizar la integridad de los componentes aerodinámicos del monoplaza hay el apartado *T.8.4 Aerodynamic Devices Stability and Strength* que incluye unos requisitos mínimos que tienen que cumplir todos los elementos aerodinámicos.

1. Todo elemento aerodinámico debe poder soportar una carga de 200 *N* distribuida sobre una superficie de 225 *cm*² y que el componente no se deforme más de 10 *mm* en la dirección de la carga.
2. Todo elemento aerodinámico debe poder soportar una fuerza puntual de 50 *N* en cualquier dirección y no deformar mas de 25 *mm*.

7.2. Diseño *Front Wing*

El conjunto *front wing* contiene varios componentes que han sido diseñados por varios miembros del equipo con la finalidad de mejorar el rendimiento y las prestaciones del monoplaza CAT13e. [2]

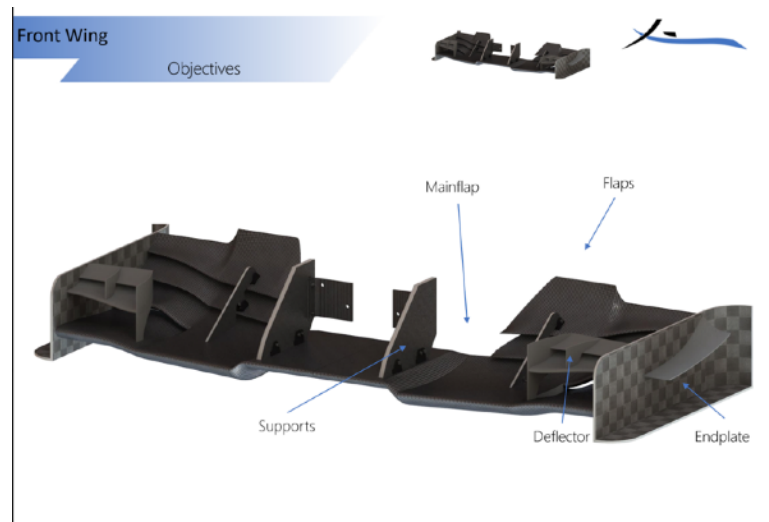


IMAGEN 7-4: CONJUNTO FRONT WING

Los objetivos principales del *front wing* son:

Reducir el *drag* creado por los neumáticos. Los monoplazas formula student son monoplazas con ruedas destapadas del estilo Formula 1 así que el diseño del *front wing* es muy importante para reducir los efectos negativos de tener los neumáticos destapados.]

Además de reducir el *drag* también se quiere incrementar la fuerza *downforce* generada con el objetivo de obtener un equilibrio óptimo teniendo en cuenta la configuración dinámica.

Finalmente se quiere distribuir el flujo de aire hacia la parte posterior para poder interactuar con los radiadores de forma óptima. Una de las propuestas para el monoplaza CAT13e es el posicionamiento de los radiadores en la zona posterior del monoplaza para incrementar el *downforce* sacando provecho del efecto suelo generado por los ventiladores de refrigeración.

7.2.1. Main wing

El *main wing* se puede dividir en 3 zonas que tienen diferentes objetivos.(Imagen 7-5)

En el centro del *main wing* se encuentra la zona P1 que ayuda a la *quilla* con el manejo de flujo de aire hacia los difusores laterales incrementando el *downforce* producido por el fondo plano. Además se encuentran los 4 insertos que sirven para sujetar el *front wing* con el monocasco

La zona P2 del *main wing* incrementa de forma sustancial la fuerza *downforce* generada por el efecto suelo.

En la zona P3 del *main wing* el componente se divide por la mitad (Imagen 7-6) para obtener dos ventajas. En primer lugar la parte superior redirige el flujo de aire, reduciendo la presión en el neumático delantero, e incrementando la eficiencia del conjunto. La parte inferior se encarga de redirigir el flujo de aire incrementando el *downforce* generado por el efecto suelo.

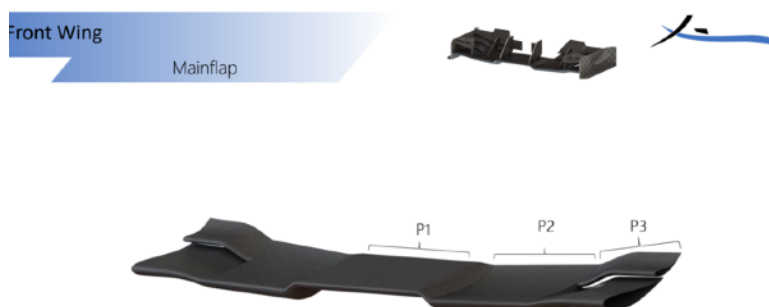


IMAGEN 7-5: ZONAS MAIN WING

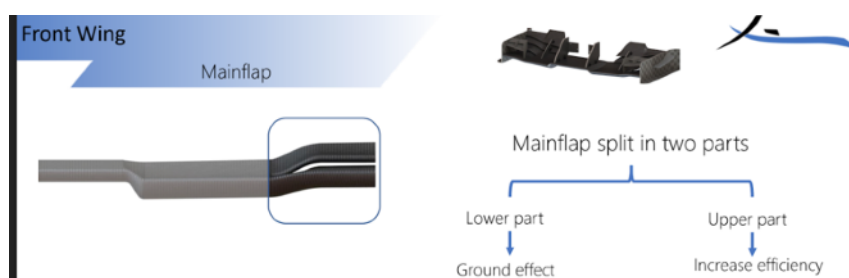


IMAGEN 7-6: EXTREMO MAIN WING

7.2.2. Flaps

Los *flaps* se encuentran en la zona superior de todo el conjunto *front wing* y aprovechan esta posición elevada para redirigir el flujo de aire hacia arriba.

La ventaja de redirigir el flujo de aire hacia arriba es que incrementa el rendimiento de los componentes aerodinámicos que se encuentran en la parte posterior del monoplaza como el *rear wing*.

Además evitan que el flujo de aire colisione con los neumáticos y los elementos del eje delantero reduciendo la fuerza de *drag*.

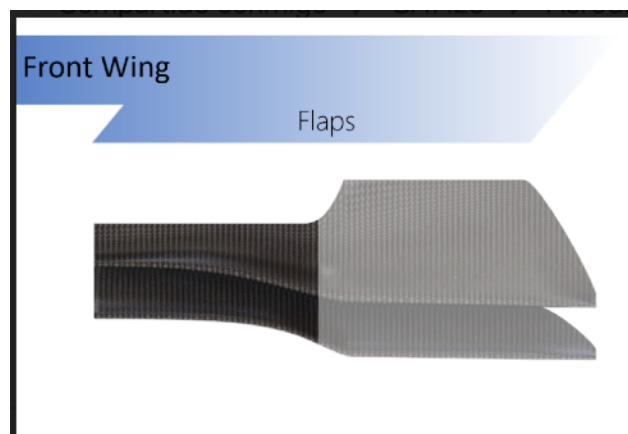


IMAGEN 7-7: FLAPS MAIN WING

7.2.3. Endplate

El componente *endplate* se encuentra en el extremo del *main wing* y realiza dos tareas importantes para mejorar el rendimiento del monoplaza.

En primer lugar genera vórtices que son redirigidos al rededor del monoplaza para reducir los efectos aerodinámicos negativos generados por los neumáticos delanteros.

Además de reducir el *drag* también se encarga de separar la zona superior e inferior del *main wing*. Separar las zona superior e inferior del Main Wing es crucial para incrementar la fuerza de *downforce* generada por la diferencia de presión. Además el componente *endplate* evita que otros flujos de aire penetren la zona inferior del *main wing* incrementando el rendimiento del efecto suelo.

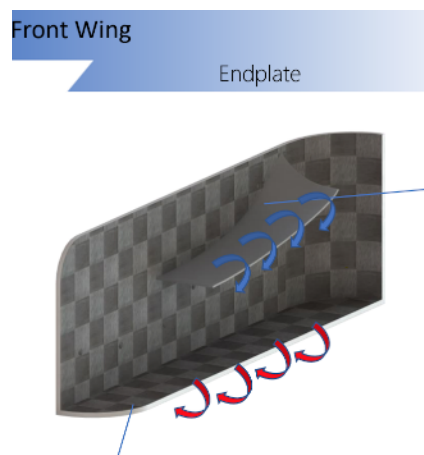


IMAGEN 7-8: ENDPLATE

7.3. Fabricación Front Wing

Con el objetivo de reducir el peso del conjunto *front wing* manteniendo una buena rigidez para soportar los esfuerzos de la carga aerodinámica, se tienen que usar materiales compuestos, específicamente polímeros reforzados con fibras de carbono.

También es necesario de que el conjunto *front wing* supere los requisitos de la normativa explicados en el apartado anterior 7.1.

El material compuesto usado principalmente en los elementos aerodinámicos del CAT13e es el polímero reforzado con fibras de carbono. Se puede obtener fibra de carbono en varios estados dependiendo si la fibra está pre-impregnada con resina epoxy o está seca y además dependiendo del trenzado de las fibras. (Imagen 7-9)

En el caso del ensamblaje *front wing* se usan los dos tipos de fibra de carbono, fibra prepreg y fibra seca.



IMAGEN 7-9: FIBRA DE CARBONO PREPREG (IZQUIERDA) Y SECA (DERECHA)

Para añadir rigidez al conjunto *front wing* se incorpora núcleo de baja densidad *Rohacell 51* (Imagen 7-10) y también se usa núcleo de aramida en disposición de panel de abeja llamado *Nomex* (Imagen 7-10).



IMAGEN 7-10: ROHACELL 51 (IZQUIERDA) Y NOMEX (DERECHA)

Además de piezas de fibra de carbono el conjunto *front wing* también contiene piezas de impresión 3D que la empresa *HP* imprime en sus instalaciones.

A continuación se explicarán los distintos procesos de fabricación necesarios para el conjunto *front wing*.

El tiempo total y el proceso de fabricación en detalle se puede encontrar en el Anexo A. Los valores para el proceso se obtuvieron de la temporada 2018/2019 con el proceso de fabricación del monoplaza CAT12e.

7.3.1. Moldes fibra de vidrio

El uso de moldes de fibra de vidrio es necesario debido a que los componentes fabricados para el *front wing* necesitan curarse en una autoclave a una temperatura de 120 °C y a una presión de 4 bares. La expansión térmica de la fibra de vidrio es similar a la expansión térmica de la fibra de carbono con lo que se logra una buena calidad superficial de los componentes.

El proceso de fabricación de los moldes de fibra de vidrio es el siguiente:

1. A partir de una pieza de madera MDF se mecaniza el modelo positivo de las dos caras del componente. (Imagen 7-9)
2. Los moldes positivos se lijan usando varias lijas de diferente grano para obtener una calidad superficial elevada y se aplica una resina de poliéster a la superficie. Al cabo de 24 horas se lija el poliéster hasta conseguir un buen acabado superficial.
3. A los modelos se les aplican varias capas de cera desmoldante y una capa de *Gelcoat RESOLCAT 2060GC ALU* que se cubre con polvo de aluminio (Imagen 7-10) para facilitar la adhesión entre la fibra de vidrio y el *Gelcoat*. La resina *Gelcoat* se aplica para obtener un buen acabado del molde. Este proceso se deja curar durante 24 horas.
4. Los cortes de fibra de vidrio se realizan previamente para poder laminar toda la pieza. Para los moldes se usan fibras de vidrio *Twill* de distintos gramajes (80 g, 200 g y 600 g) y se laminan varias capas de cada gramaje (3, 3 y 6 capas). En cada capa de fibra de vidrio la orientación de las fibras varía entre 0° y 45°.(Imagen 7-11)
5. Una vez toda la fibra está laminada se preparan las bolsas de vacío y el sistema de absorción de resina usando bolsas auxiliares para absorber la resina sobrante. (Imagen 7-12 y 7-13)
6. Una vez toda la fibra está impregnada con resina se procede a curar los moldes en una autoclave a 60°C durante 8 horas y a una presión de 4 bares. (Imagen 7-14). La presión de la autoclave es muy importante para garantizar un buen acabado superficial de los moldes.
7. Una vez ha terminado el curado se tiene que desmoldar los modelos y terminar de mecanizar la superficie de los moldes para obtener un buen acabado superficial.
8. Si hay cualquier defecto en la superficie se puede reparar usando masilla y lijando el molde para obtener el perfil deseado.



IMAGEN 7-9: MODELO DE MADERA MDF



IMAGEN 7-10: MOLDES CON GELCOAT Y POLVO DE ALUMINIO



IMAGEN 7-11: CORTES DE FIBRA DE VIDRIO



IMAGEN 7-12: SELLANDO BOLSA DE VACÍO CON TAKY TAPE



IMAGEN 7-13: MODELOS CON FIBRA DE VIDRIO INFUSIONADA CON RESINA



IMAGEN 7-14: MOLDES EN AUTOCLAVE

7.3.2. Piezas de fibra de carbono prepreg

Las piezas de fibra de carbono prepreg requieren curar a una temperatura elevada de 120°C y a una presión de 4 bares, por eso es necesario el uso de moldes de fibra de vidrio y es necesario una autoclave.

La fibra prepreg se puede laminar directamente encima de los moldes de fibra de vidrio que hayan sido previamente acondicionados. El proceso de fabricación es el siguiente:

1. Se tienen que preparar los moldes para poder laminar la fibra de carbono prepreg. Primero se les aplican 2 capas de tapaporos llamada *Frekote B-15* y luego se les aplican 6 capas de desmoldante llamado *Frekote 770-NC*. Entre capa y capa se debe esperar un mínimo de 15 minutos.
2. Se realizan los cortes de fibra de carbono usando una *plotter* que nos deja usar la empresa Nexus projectes. Los cortes son altamente precisos y la orientación de cada capa varía entre 0° y 45 °.
3. Una vez la primera piel está laminada se lamina una capa de *peel ply* (Imagen 7-15), un tejido que proporciona rugosidad a la superficie. Mas adelante esta rugosidad ayudará con la unión del núcleo de la pieza y la piel usando *Sidetch* (Imagen 7-16).
4. Se realiza el vacío de la pieza y se cura en una autoclave a 120°C durante 2 horas a 4 bares de presión. (Imagen 7-17) La presión de la autoclave es muy importante para generar un buen acabado superficial del componente.
5. Una vez curada la pieza se desmolda y mecaniza para encajar con el núcleo.
6. El núcleo de la pieza formado por *Rohacell 51* y los insertos se han mecanizado para encajar con la piel de fibra de carbono que se ha curado.
7. El núcleo de *Rohacell 51*, los insertos y las costillas se juntan con la piel de fibra de carbono usando *Resina CLR y CLS*. (Imagen 7-18)
8. Una vez todos los componentes están fijos se mecaniza la superficie para obtener un buen acabado superficial y se le aplica el abrillantador MPP.



IMAGEN 7-15: FIBRA LAMINADA CON CAPA DE PEEL PLY



IMAGEN 7-16: FIBRA CON SIDETECH



IMAGEN 7-17: PRIMERA CAPA DE FIBRA DE CARBONO



IMAGEN 7-18: VISTA LATERAL DEL MAIN WING

7.3.3. Piezas de fibra de carbono seca

A diferencia de la fibra prepreg la fibra seca no requiere el uso de una autoclave ni un horno para curar. A temperatura ambiente la resina y el endurecedor crean una reacción exotérmica que cura con la fibra de carbono seca.

Con los moldes de madera *MDF* bien acondicionados se pueden crear las piezas sin la necesidad de fabricar moldes de fibra de vidrio. El procedimiento para crear una pieza usando fibra de carbono seca es el siguiente:

1. En la superficie del modelo de madera se aplican varias capas de cera desmoldante para facilitar la extracción de la pieza una vez el componente esté curado.
2. Los diferentes cortes de fibra seca se realizan a mano cambiando la orientación de cada capa entre 0° y 45°.
3. El proceso de laminado de la fibra seca es diferente al de la fibra prepreg y es de vital importancia el tiempo. La reacción de la resina empieza al cabo de 1 hora de estar expuesta al medio ambiente, por lo tanto el proceso de impregnación y laminación debe ser lo más rápido posible. La relación de peso entre la resina y la fibra seca es de un 60/40 %.
4. Una vez la primera piel está laminada se inserta en una bolsa de vacío para dejar curar durante 8 horas.
5. El núcleo *Nomex* se corta a medida para encajar con la piel ya curada y también se posicionan los insertos.
6. Las dos pieles se pegan con un adhesivo encima del núcleo y los insertos.
7. Después de 24 horas la pieza esta pegada y se mecaniza para lograr un buen acabado superficial. Para mejorar la apariencia se le aplica el abrillantador MPP.

7.3.4. Ensamblaje del front wing

Una vez todas las piezas están fabricadas, ya sea mediante fibra seca, fibra prepreg o impresión 3D se tienen que fijar mediante un adhesivo de resina *CLR* y *CLS* y con insertos.

Primero las *endplates* se fijan a los extremos del *main wing* mediante unos pasadores y el adhesivo *CLR* y *CLS*.

Seguidamente el componente *deflector* (Imagen 7-19) se fija al conjunto mediante pasadores y el adhesivo *CLR* y *CLS*.

Los *flaps* y los soportes se fijan al *main wing* usando tornillos que se fijan en los insertos localizados dentro del componente *main wing* y en pasadores localizados en la *endplate*.

El acabado final de todo el ensamblaje se termina con la colocación de las pegatinas de los patrocinadores y con acabados decorativos reflejando los colores del equipo ETSEIB Motorsport.(Imagen 7-20, 7-21 y 7-22)



IMAGEN 7-19: DEFLECTOR FABRICADO CON IMPRESIÓN 3D



IMAGEN 7-20: CONJUNTO FRONT WING ANTES DE PULIR



IMAGEN 7-21: CONJUNTO FRONT WING CON PEGATINAS PATROCINADORES



IMAGEN 7-22: CONJUNTO FRONT WING CON PEGATINAS DE COLORES DEL EQUIPO

8. DISEÑO SOPORTE FRONT WING

8.1. Historia

En las pasadas temporadas se han usado varias configuraciones para posicionar y anclar el conjunto *front wing* con el monocoque.

En la temporada del Cat10e se usó un método que consistía en fijar el conjunto *front wing* mediante 2 barras rígidas que se fijaban al lateral del monocoque y con un tornillo en el lateral del *flap* interno del *front wing*. (Imagen 8-1)



IMAGEN 8-1: CAT10E CON SOPORTE DE BARRAS RÍGIDAS

Éste método pudo soportar los esfuerzos generados por la carga aerodinámica y cumplía con la normativa pero tenía la gran desventaja de que influenciaba de una forma muy perjudicial el flujo de aire que pasaba por los componentes aerodinámicos. Además la complejidad de las barras rígidas incrementaban el peso total del conjunto.

En la temporada siguiente, con el monoplaza CAT11e, se cambió de configuración y se optó por colocar unos soportes en forma de L fijados en la zona de la AIP. (Imagen 8-2)



IMAGEN 8-2: CAT11E CON SOPORTE EN EL LATERAL

Por un lado el peso del conjunto se redujo de forma significativa pero la influencia del elemento de soporte en forma de L con el flujo de aire generaba mucho *drag* y turbulencia.

En el CAT12e se optó por aprovechar los tornillos empleados para el conjunto atenuador de impactos para fijar unas estructuras en forma de L (Imagen 8-3). Éstas estructuras en forma de L permiten atornillar el conjunto *front wing* con el monocasco minimizando la perturbación del flujo de aire a la parte inferior del monoplaza y maximizando el efecto suelo.

Además es una configuración que permite el cambio de altura de todo el conjunto *front wing* para encontrar el posicionamiento deseado para su máximo rendimiento.

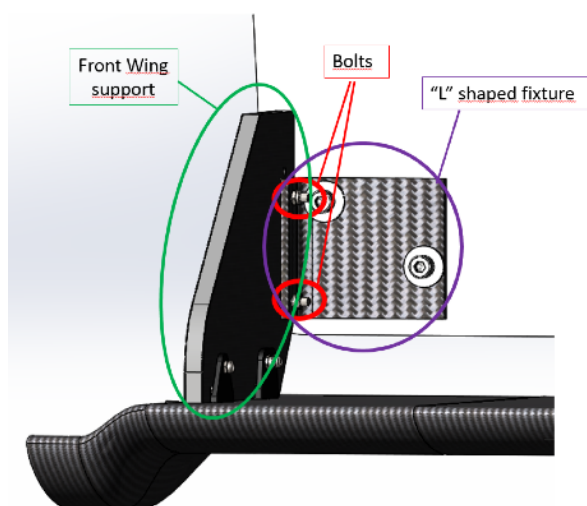


IMAGEN 8-3: SOPORTE FRONT WING CAT12E

Para lograr que la configuración del CAT12e funcione se debe cortar el elemento "Nose" y encajarlo de forma que permita el posicionamiento del *front wing*.

Para la temporada 2019/2020 se pretendía competir con una versión del atenuador de impactos fabricado íntegramente de polímero reforzado con fibras de carbono. (Imagen 8-4)

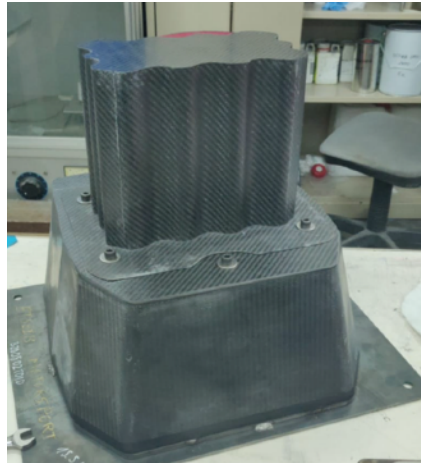


IMAGEN 8-4: DUMMY IA ASSEMBLY

Para poder competir con esta configuración de atenuador de impactos se debe demostrar que cumple con la normativa y entregar el documento IAD para que los jueces revisen los resultados de los ensayos y los cálculos realizados. El atenuador de impactos es de gran importancia porque en caso de impacto frontal es el elemento principal que absorberá energía y protegerá al piloto.

Durante la revisión del IAD los jueces resaltaron que los soportes del *front wing* tendrían una influencia con la desaceleración en el ensayo del atenuador de impactos y por ese motivo la configuración de la temporada pasada era inválida.

Un rediseño del soporte es necesario para cumplir con los requisitos de la normativa y los jueces.

8.2. Puntos y métodos de anclaje

La localización de los puntos y métodos de anclaje tiene varios condicionantes que influyen en su configuración. Debido a la reutilización de los moldes de fabricación de la temporada anterior se ha tenido que diseñar alrededor de una configuración que es poco modificable.

8.2.1. ¿Qué es un inserto y dónde se encuentran?

Tal y como se explica en el apartado 7.2.1 el *front wing* incorpora en la zona central cuatro insertos que sirven para fijar el *front wing* con el monocasco.

El material usado principalmente en la estructura del monocasco del CAT13e es el polímero reforzado con fibras de carbono. Para que el polímero reforzado con fibras de carbono obtenga una gran resistencia mecánica se emplea la disposición de panel *sandwich* (Imagen 8-5) para proporcionar inercia al material.

El núcleo puede estar formado con espuma o una estructura de panal de abeja de aluminio

o aramida. Este material no tiene mucha resistencia estructural pero combinado en disposición de *sandwich* con dos pieles de fibra de carbono en el exterior tienen una gran resistencia mecánica.

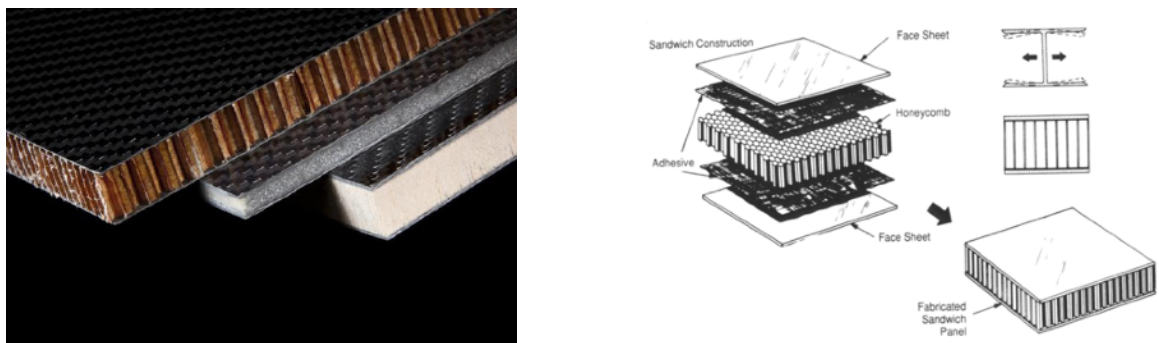


IMAGEN 8-5: CONFIGURACIÓN DE PANEL SANDWICH

El componente *front wing*, tal y como se ha comentado en el apartado 7, está formado con *Rohacell 51* y polímero reforzado con fibras de carbono *Twill*.

Uno de los problemas de este diseño, dada la poca resistencia del núcleo, es que los tornillos pueden deformar el componente perdiendo así la resistencia aportada por el incremento de inercia del núcleo.

Con tal de evitar esta situación es necesario incorporar un elemento más resistente para que pueda distribuir los esfuerzos axiales de los puntos de anclaje. Los componentes encargados de distribuir los esfuerzos se llaman insertos. (Imagen 8-6)

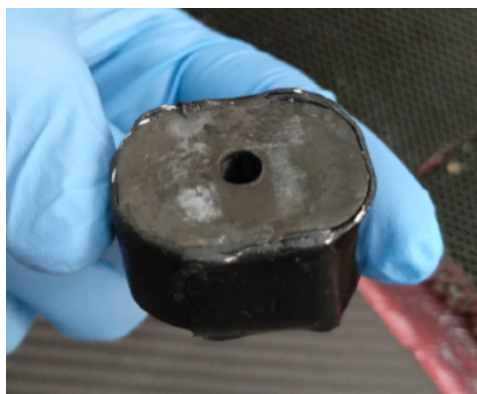


IMAGEN 8-6: INSERTO

Los materiales usados para el inserto pueden variar dependiendo de los esfuerzos mecánicos que se apliquen en ese punto de anclaje en concreto.

En el caso del soporte del conjunto *front wing* el material usado está fabricado laminando muchas capas de fibra de carbono y creando una pieza de fibra de carbono maciza (llamada monolítico).

La función principal del inserto es repartir los esfuerzos del punto de anclaje así que la

dimensión del perímetro tiene que ser suficientemente grande para poder repartir las fuerzas a través de las pieles de fibra de carbono.

Con tal de reducir el peso de estas piezas los insertos del CAT13e se han diseñado con agujeros específicos para cada caso. Estos vaciados se realizan con corte de agua y luego se rellenan con núcleo de aramida.



IMAGEN 8-7: INSERTO RELLENO CON ARAMIDA

La posición de los insertos en el *front wing* está fijada por los moldes de la temporada pasada.

8.2.2. Métodos de anclaje

La normativa establece que el atenuador de impactos tiene que ensayarse con una masa de 300 Kg a una velocidad de 7 m/s y no puede superar una desaceleración media de 20 m/s² y sin picos de desaceleración de más de 40 m/s². Con la configuración de la temporada pasada del soporte de *front wing* el atenuador de impactos de esta temporada no lograría la desaceleración adecuada y no se podría llevar el vehículo a las competiciones de verano.

El apartado T3.19.4 de la normativa de FSG establece que se puede ensayar el atenuador de impactos de varias maneras mientras la fuerza total no supere los 120 kN.

En el segundo punto del apartado se especifica que se puede combinar la fuerza ensayada del atenuador de impactos y la fuerza de cizalla de los elementos de soporte para demostrar que el conjunto no supera los 120 kN.

La información de la fuerza absorbida por el atenuador de impactos se puede encontrar en el documento IAD y el valor de la fuerza de cizalla se puede calcular a partir del tipo de tornillo que se usa para fijar el soporte con el monocasco. A continuación hay los cálculos:

La fuerza absorbido por el atenuador de impactos des de 68.201 N. Esta información se puede obtener del documento IAD.

$$F_f = A_{\text{useful}} \cdot \tau$$

$$\tau = 0,65 \cdot \sigma$$

$$A_{\text{useful}}(M5) = 12,68 \text{ mm}^2$$

$$\sigma(\text{grade 8.8}) = 800 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$F_f(M5) = 0,65 \cdot 800 \cdot 12,68 = 6594 \text{ N}$$

$$F_f(4 \times M5) = 4 \cdot F_f(M5) = 26374 \text{ N}$$

$$\text{Max. Stroke(IAA dynamic test)} = 68201 \text{ N}$$

$$F_{f_{\text{total}}} = 26374 \text{ N} + 68201 \text{ N} = 94575 \text{ N} < 120 \text{ kN}$$

La fuerza total teniendo en cuenta el ensayo dinámico y la fuerza de cizalla de los tornillos M5 es menor que 120 kN así que esta configuración cumple con la normativa.

8.2.3. Sujeción con los componentes U

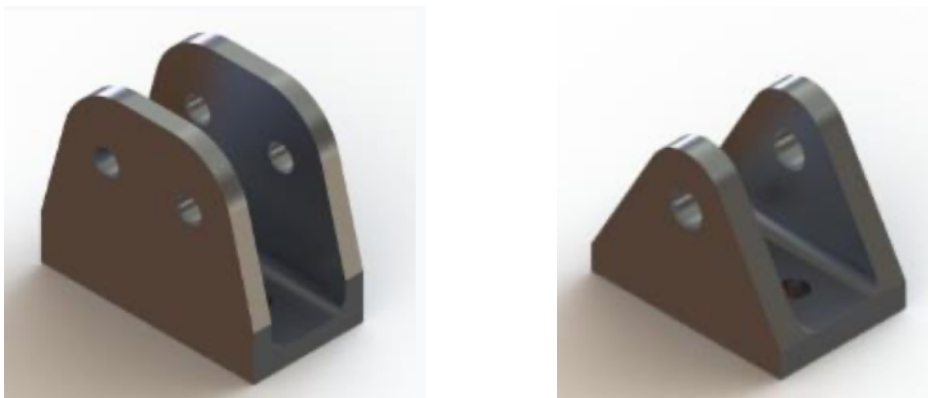


IMAGEN 8-8: COMPONENTES EN FORMA DE U DEL FRONT WING

En la parte central del *front wing* se encuentran cuatro componentes en forma de U que están unidos al *front wing* mediante tornillos no pasantes.

El tornillo que fija éste componente con el conjunto *front wing* es un tornillo no pasante que se fija en los insertos posicionados dentro del *main wing*. Para lograr que los componentes se puedan atornillar, el inserto será perforado con rosca.

El componente en sección de U está formado con aluminio 7075 T6 y se mecaniza en una empresa externa a la universidad.

Las posiciones, dimensiones y los tamaños de los agujeros de los componentes U están fijados y no se pueden cambiar.

El soporte de *front wing* se tiene que adaptar con los agujeros ya presentes en los

componentes en forma de U y se fijan usando tornillos ISO 4017/DIN 933 M5 8.8 de 35 mm de recorrido.

Debido a la separación presente entre las paredes del componente U y el soporte se tiene que llenar el espacio sobrante usando arandelas.

8.2.4. Puntos y método de sujeción con el monocasco

Puntos de sujeción

El posicionamiento de la sujeción del soporte del conjunto *front wing* con el monocasco está limitado por la geometría del monocasco, la influencia aerodinámica y los componentes dinámicos que encontramos en la zona delantera del monocasco.

Teniendo en cuenta los limitantes geométricos, la zona disponible para posicionar el elemento de soporte del conjunto *front wing* es la parte inferior de la zona delantera del monocasco.

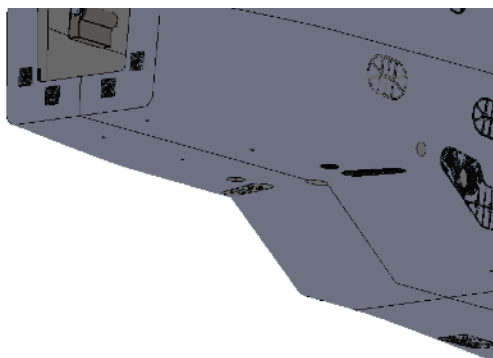


IMAGEN 8-9: ZONA DELANTERA INFERIOR DEL MONOCASCO

La perturbación del flujo aerodinámico se minimiza, comparado con el posicionamiento lateral de la configuración usada con el CAT11e, pero se debe tener en cuenta que en esa zona se encuentra la entrada de aire para el fondo plano.

El elemento “Quilla” se encuentra en la entrada del fondo plano y se encarga de distribuir el flujo de aire hacia el fondo plano de forma ordenada.

Una de las modificaciones del monoplaza CAT13e es el posicionamiento de los radiadores para la refrigeración. En la temporada 2019/2020 se pretendía posicionar los radiadores en la parte trasera para garantizar una entrada de aire de forma “limpia”. El aire que pasa por debajo del monocasco no se ve influenciado por ningún elemento y garantiza que el flujo de aire sea el adecuado para un buen rendimiento de los radiadores.

La limitación impuesta para no perturbar el flujo de aire concluye con que el soporte debe estar localizado de tal manera que esté lo más alejado posible de la Quilla para no

influenciar negativamente el flujo de aire dirigido al fondo plano.

Finalmente se tiene que tener en cuenta los elementos presentes en el interior del monocasco.

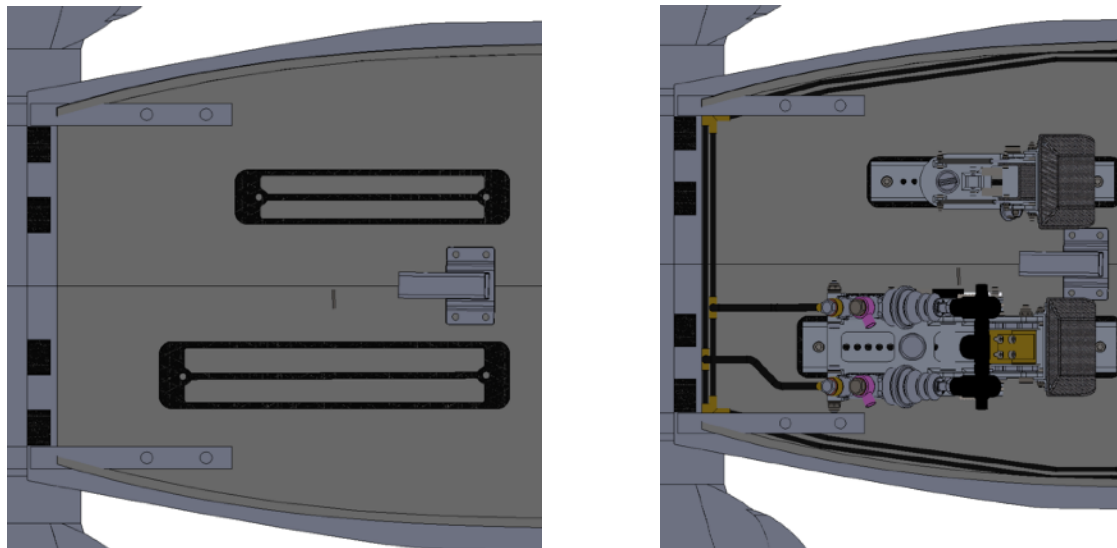


IMAGEN 8-10: INSERTOS Y CONJUNTO PEDALES EN LA PARTE DELANTERA DEL MONOCASCO

En la parte delantera del monocasco se encuentran los pedales de freno y aceleración del monoplaza y se encuentran sus debidos insertos dentro del monocasco.

La posición de los pedales viene estrictamente impuesta por la normativa y el diseño de todo el monoplaza CAT13e se realiza alrededor del conductor. El posicionamiento de los pedales no se puede modificar sin tener que rediseñar todo el monoplaza.

Para fijar el soporte con el monocasco se deben usar los elementos insertos en el monocasco y requieren un espacio mínimo para no interferir con los insertos de los pedales.

Con todas las restricciones impuestas por el diseño del monocasco, los efectos aerodinámicos y por la localización de elementos como los pedales, se pueden fijar las posiciones de los puntos de anclaje del soporte.

La posición del primer punto de anclaje con el monocasco se fija en la parte frontal más adelantada posible. Así el soporte sufre el mínimo esfuerzo de flexión creado por la fuerza que genera la carga aerodinámica del *front wing*.

El segundo punto de anclaje se encuentra a 50 mm de distancia respecto al primero. La posición de este punto se ha fijado con la condición de que el inserto que es necesario colocar dentro del monocasco tenga espacio. El inserto dentro del monocasco se debe colocar a una distancia mínima de la esquina del monocasco debido a que esta zona tiene

una menor resistencia mecánica.

El posicionamiento de los insertos lejos de las esquinas es una lección aprendida del CAT11e que sufrió un fallo catastrófico en la zona de dirección delantera debido a que los insertos se encontraban cerca de esquinas en el monocasco.

Una vez las posiciones de los agujeros están fijadas en el monocasco se realiza un análisis usando *HyperWorks* para verificar que el soporte soporta los esfuerzos que el *front wing* genera. El análisis se puede encontrar en el apartado 9.

Métodos de sujeción:

Durante toda la temporada el monoplaza se transportará a varias pistas de ensayos para mejorar la configuración dinámica o para ensayar sistemas de *torque-vectoring* entre muchas otras cosas. Para llegar a las pistas de ensayo el monoplaza se transporta mediante un remolque. Este remolque tiene una dimensión de anchura que impide que el monoplaza entre en el remolque con el conjunto *front wing* instalado. Por este motivo el conjunto *front wing* se debe poder desmontar de forma fácil y segura sin el uso de herramientas especializadas.

En la ilustración inferior se puede observar el método de sujeción del soporte con el monocasco.

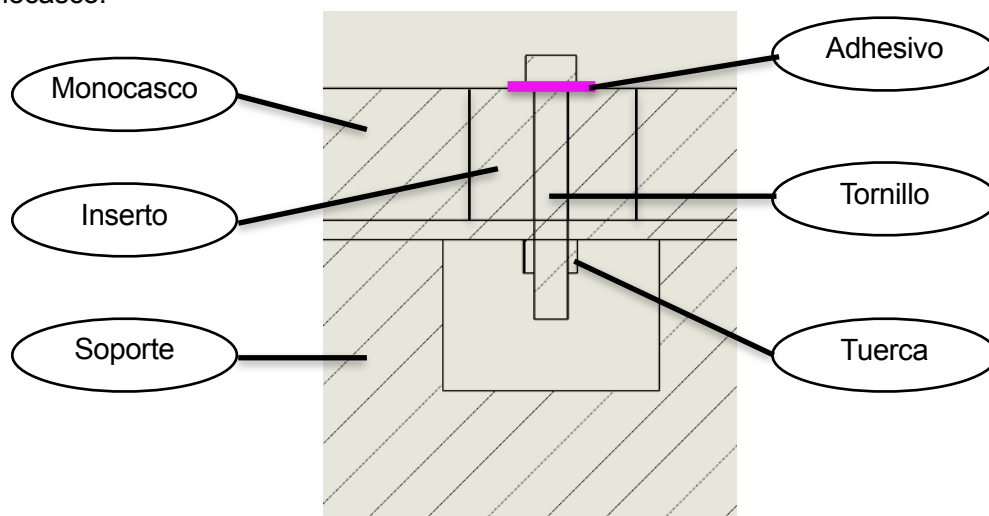


IMAGEN 8-11: VISTA SECCIÓN MÉTODO DE AJUSTE CON EL MONOCASCO

Un tornillo M5 de 35 *mm* pasa a través del monocasco y está sujeto usando un adhesivo industrial llamado *ADEKIT H 9951* con tal de evitar su movimiento rotacional.

En la parte inferior del monocasco el tornillo sobresale y permite el posicionamiento del soporte que se puede fijar usando una tuerca. Esta configuración permite fijar el soporte usando una herramienta (carraca) y sin la necesidad de acceder al interior del monocasco.

8.3. Geometría

La geometría final del soporte viene condicionada por las limitaciones de los puntos de anclaje y los métodos usados para fijar el soporte.

Teniendo en cuenta todas las limitaciones expuestas anteriormente se diseñó el soporte mediante el programa CAD *SolidWorks*. El mejor diseño al que se ha llegado para el soporte es un soporte con sección en forma de T

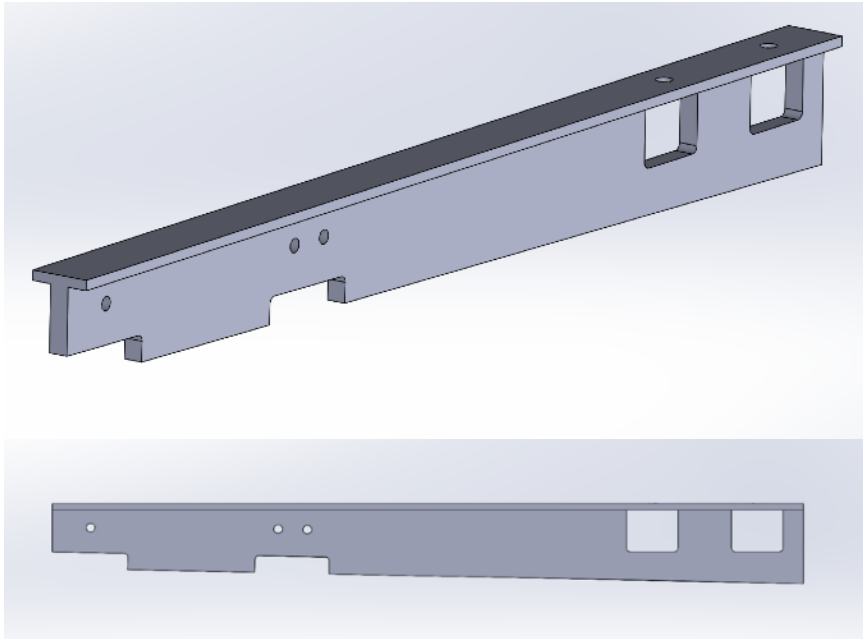


IMAGEN 8-12: MODELO SOPORTE INICIAL

La geometría en forma de T se adapta de forma perfecta a los puntos y métodos de anclaje presentes en el monocasco y en el conjunto *front wing*.

Por un lado se puede fijar con los componentes U con el uso de tornillos y sin tener que readaptar los puntos de anclaje. Por otro lado se puede fijar en la zona inferior del monocasco.

Además los perfiles en forma de T tienen muy buenas propiedades mecánicas en cuanto a la resistencia de fuerzas verticales.

8.4. Material usado

El material usado para el soporte tiene que poder adaptarse a la geometría en forma de T, tener buenas propiedades mecánicas y una baja densidad para reducir el peso. El material seleccionado es el Aluminio 6082 con un tratamiento térmico T6/T651.

Para poder fabricar el soporte con sección en forma de T se estudian varios métodos de fabricación y se establece que una buena manera de lograr el resultado es soldar dos láminas de aluminio. Los cortes de las láminas de aluminio se pueden hacer con la técnica de corte láser ya que la precisión es muy buena y no deforma de forma significativa el material.

Otro aspecto a tener en cuenta durante la selección del aluminio es el cambio de las propiedades del aluminio bajo el proceso de soldadura. Es necesario un aluminio que pueda ser soldado de forma correcta y que además tenga un límite elástico elevado para soportar las cargas generadas por el *front wing*.

8.5. Fabricación Soporte

Debido a que las herramientas necesarias para fabricar el soporte no están disponibles en la universidad ni son accesibles para ser usadas por los miembros del equipo el proceso de fabricación del soporte se delega a empresas externas al equipo.

El primer paso para fabricar el soporte es cortar las dos piezas de aluminio laminado de 3 mm y 6 mm mediante corte láser.

Una vez las dos partes de cada soporte están cortadas se tienen que soldar. Para ello las dos partes se envían a la empresa *Prats Casa Joana* encargada de realizar las soldaduras. Durante las dos últimas temporadas se han tenido muy buenos resultados de los soldadores realizadas por esta empresa.

Finalmente una vez la pieza está soldada se le aplica un tratamiento de anodizado para obtener una capa de protección que proporciona una mayor resistencia y durabilidad. El proceso de anodizado incrementa el espesor de la capa natural de óxido en la superficie (llamado alúmina en los aluminios) mediante el proceso electrolítico de pasivación.

9. SIMULACIÓN

El proceso de simulación de todo el ensamblaje *front wing* se detalla en este apartado. Se realiza un análisis en más detalle del componente soporte debido a que posteriormente se quiere realizar una optimización topológica.

El diseño del conjunto *front wing* se validó durante la temporada 2018/2019 en el CAT13e mediante el estudio mecánico realizado para el evento de design de *Formula Student Spain* y durante el uso del conjunto durante la temporada. Pero aunque se haya validado estructuralmente durante la temporada pasada es necesario realizar un análisis para garantizar que los cambios propuestos con el diseño del nuevo soporte no afectan la integridad del conjunto.

El proceso de análisis del modelo sigue los siguientes pasos:

9.1. MODELO

En primer lugar se debe importar el conjunto diseñado mediante el software CAD *SolidWorks* usando el formato *IGES* al software FEM *HyperMesh*.

Después de organizar las superficies y sólidos en diferentes componentes y colores obtenemos el modelo visualizado en la Imagen 9-1

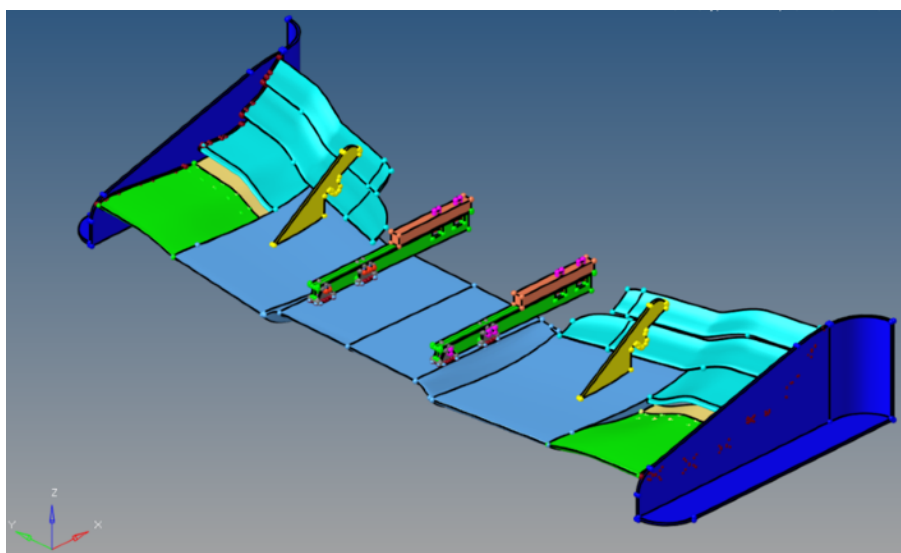


IMAGEN 9-1: MODELO HYPERMESH DEL CONJUNTO FRONT WING

El diseño del conjunto *front wing* se basa en el diseño de la temporada 2018/2019 y no se ha modificado de forma drástica.

Se puede observar que el conjunto del soporte forma parte del modelo y se encuentra en su posición relativa con el monocasco y el conjunto *front wing*.

En la Imagen 9-2 tenemos una vista ampliada e individualizada del conjunto soporte.

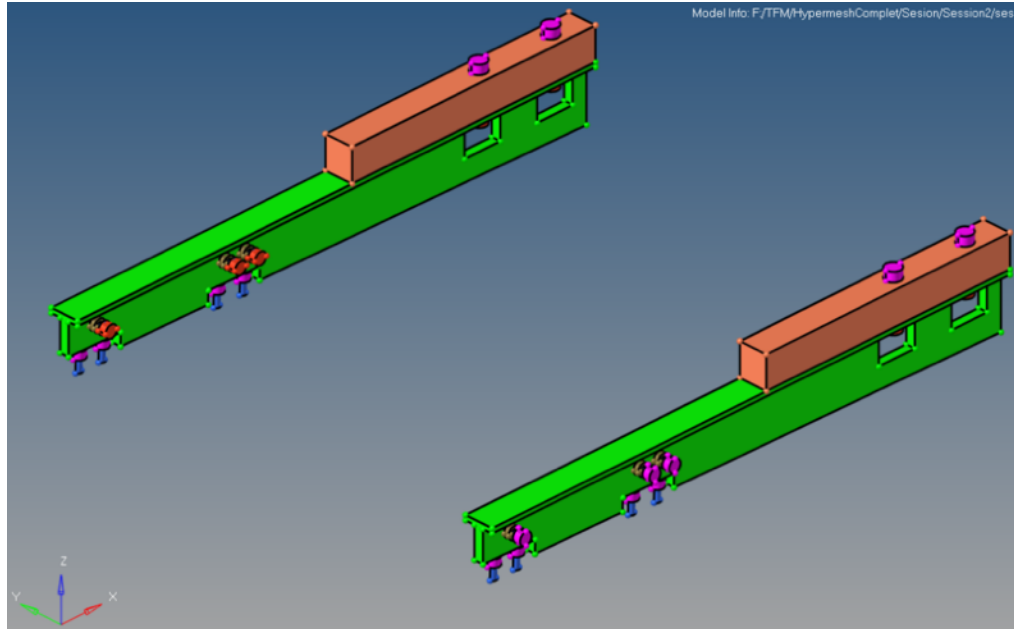


IMAGEN 9-2: MODELO CON SOPORTE (VERDE) Y MONOCASCO (NARANJA) CON TORNILLOS Y TUERCAS

Se puede observar los diferentes componentes que forman parte de este conjunto. Los elementos mostrados son los siguientes:

Verde: Iteración 1 del soporte del conjunto *front wing*.

Naranja: Representación del monocasco. Este componente representa la estructura del monocasco. Para el estudio se ha considerado que el elemento monocasco tiene una alta rigidez y unas propiedades mecánicas muy elevadas, se considera casi como un rígido.

Rosa/Azul: Los componentes que forman parte del tornillo/arandela/cabeza de tornillo/tuerca. Se han tenido que dividir para poder aplicar la fuerza de pretensión que se explicará en el apartado 9.3.

9.2. MALLADO

El proceso de mallado del modelo es imprescindible para realizar el estudio mecánico y es crítico para obtener unos resultados que representen la realidad.

El proceso mediante elementos finitos consiste en dividir el modelo en pequeños elementos y luego aplicar las condiciones de contorno, propiedades, interacciones... entre ellos para

realizar el estudio.

Los resultados obtenidos y el tiempo de computación del análisis depende del buen mallado del modelo y el número de elementos así que es crítico realizar un buen mallado.

Debido a que la potencia computacional es limitada los distintos componentes se tienen que mallar usando precisiones de mallado variables dependiendo de la importancia y criticalidad de los componentes.

Los componentes que precisen un resultado más preciso se mallan usando elementos más pequeños y los componentes que no precisen un resultado tan exacto se mallan usando elementos de un tamaño superior.

Durante este estudio el hardware usado, ver apartado 12, tiene una limitación computacional y se tiene que simplificar y optimizar el modelo para poder realizar los análisis y las optimizaciones topológicas.

Hay distintos tipos de elementos usados en este estudio. Por un lado tenemos los elementos 3D que se usan para los elementos sólidos observados en la Imagen 9-3.

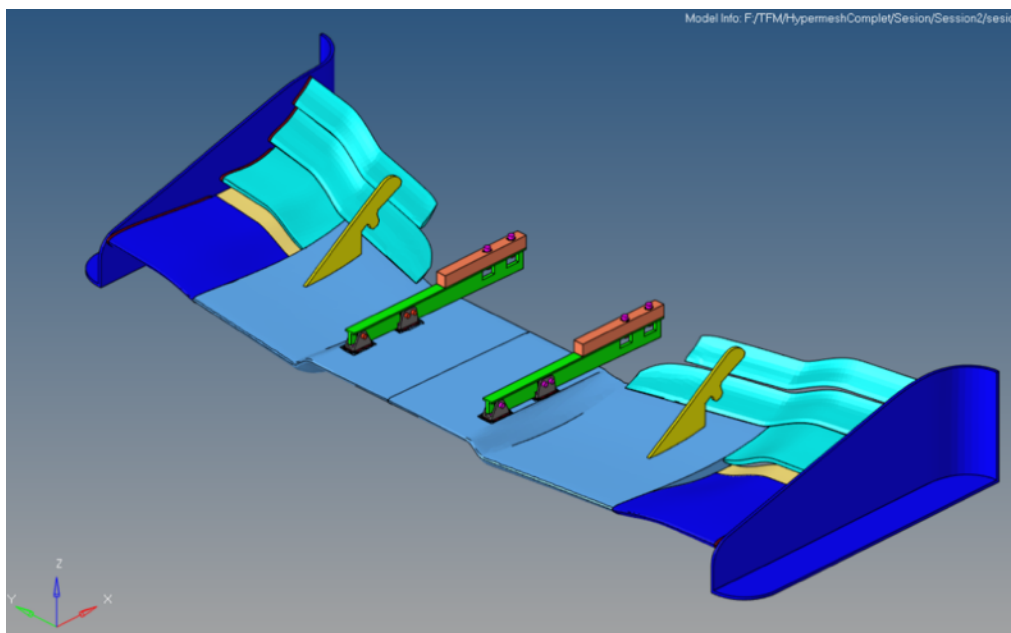


IMAGEN 9-3: COMPONENTES MALLADOS USANDO ELEMENTOS 3D

Hay varios tipos de elementos 3D que se pueden usar para mallar los modelos: cuadrado (quads), triangulares (trias), mixto (mixed), medio triángulo (R-trias).

Para el mallado del conjunto *front wing*, teniendo la limitación de potencia computacional, los componentes se malla con tamaños de elementos que varían entre 0,2 mm para el soporte hasta 8 mm para el core de Rohacell 51 del componente *main wing*.

Otra propiedad que se ha usado para obtener un buen mallado es la opción de *edge curvature*. Con la propiedad *edge curvature* se puede refinar los elementos que se encuentran al borde de una esquina y se incrementa el tamaño de los elementos que se encuentran en zonas continuas.

Aún así, debido a la limitación computacional y la necesidad de mallar el soporte con una gran densidad de elementos para realizar el estudio y la optimización topológica, el modelo se tiene que simplificar (Imagen 9-4). Con la simplificación del modelo se puede realizar un primer análisis del primer diseño del soporte con parte de los componentes del conjunto *front wing*.

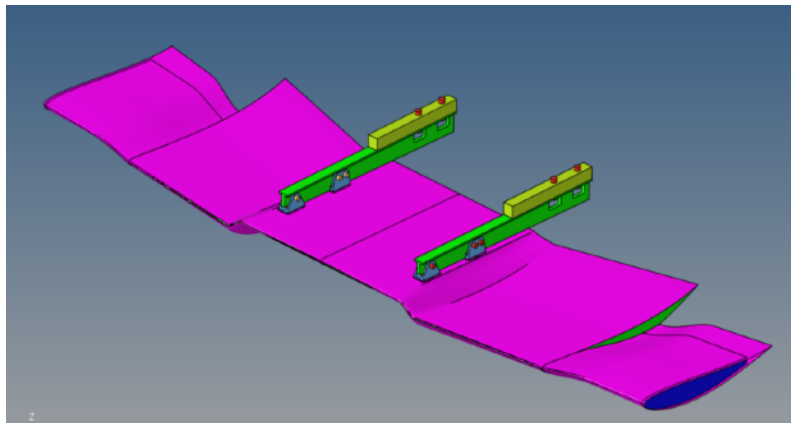


IMAGEN 9-4: MODELO SIMPLIFICADO PARA REALIZAR EL PRIMER ANÁLISIS

Una vez los componentes están mallados se les asignan propiedades específicas. En el caso de los elementos 3D sólidos se les asigna la propiedad *PSOLID* con el material específico respectivamente.

A continuación, se observa el mallado inicial del soporte del conjunto *front wing* en la Imagen 9-6. Se puede observar el soporte con unas zonas donde los elementos son de color rojo. El motivo para que estos elementos sean de otro color es porque más adelante, en el proceso de optimización, se definirán estas zonas como *No Design*.

El tipo de elementos usados para mallar la superficie del componente soporte son el tipo de elementos *Mixed* y para los elementos 3D se ha usado el tipo *Mixed* ya que en los dos casos se adaptan de forma precisa al modelo.

El uso de los otros tipos de elementos producían errores en las esquinas del soporte y durante el *Element Quality Check* que es el proceso de análisis del modelo.

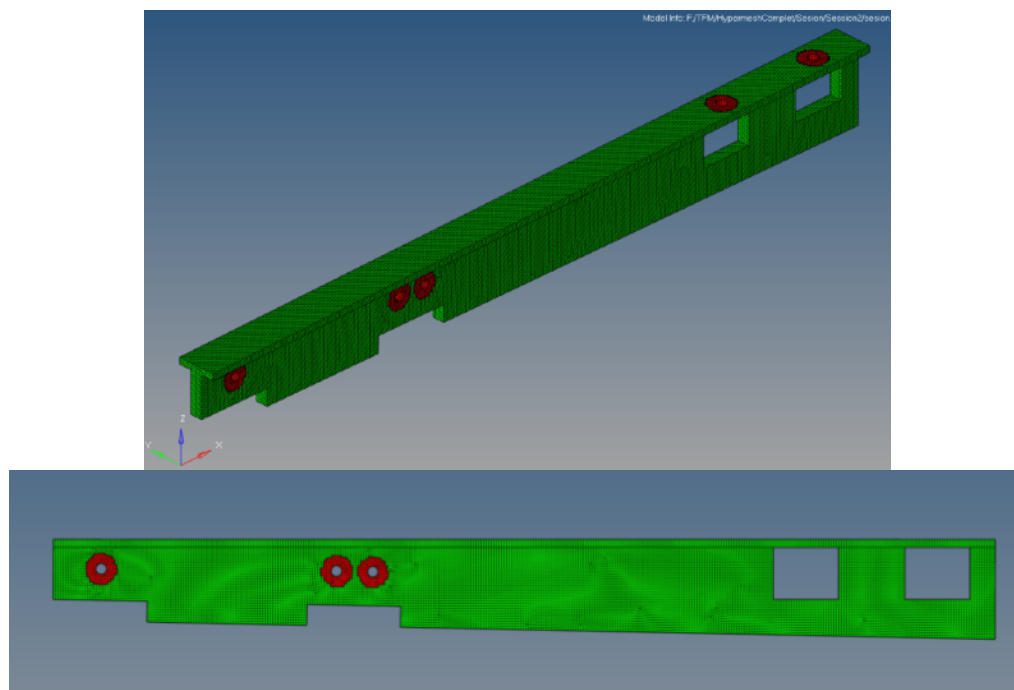


IMAGEN 9-5: SOPORTE MALLADO CON ELEMENTOS 3D MIXED

También se han usado los elementos tipo *Shell* para mallar las superficies de fibra de carbono del conjunto *front wing* que se han importado del programa CAD *SolidWorks*.

La propiedad asignada para este tipo de elementos es de tipo PSHELL que permite definir el grosor de la capa de polímero reforzado con fibras de carbono.

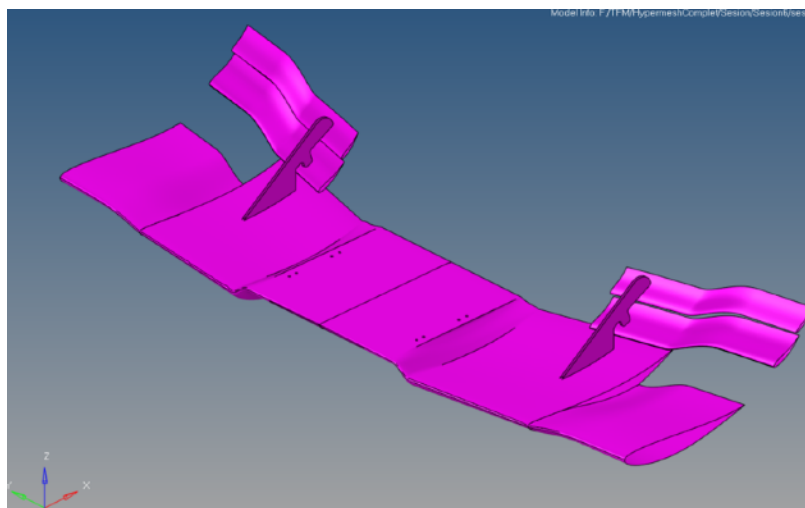


IMAGEN 9-6: SUPERFICIES MALLADAS CON ELEMENTOS TIPO SHELL

9.3. Superficies de contacto

Durante el proceso de mallado se han definido varios componentes que forman el conjunto *front wing*. Para definir la relación que tienen entre unos y otros es necesario crear superficies de contacto y grupos entre ellos.

Las superficies de contacto permiten la creación de interacciones, ya sean *freeze*, *slide* o *stick*. Entre las superficies de los elementos de un componentes y las superficies de los elementos de otros componentes. El proceso para crear una interacción entre componentes es el siguiente:

1. Se malla los componentes con elementos 3D o con elementos tipo *Shell*.
2. Se crean las superficies de contacto usando las superficies de los elementos de los componentes mallados. Se puede observar en la Imagen 9-8 que los elementos de la superficie de contacto sobresalen de la superficie de los elemento del componente y forman una geometría triangular. Los triángulos que sobresalen de los elementos son los elementos usados para crear los grupos de las superficies de contacto.
3. Con tal de crear la interacción se crea un grupo entre las dos superficies de contacto. Los parámetros que se tienen que definir en el grupo son los siguientes:

Cardimage: Para definir que hay un contacto entre los dos componentes se define este parámetro como *contact*.

Type: El parámetro *type* define qué tipo de contacto hay entre los dos componentes. Hay 3 tipos de contactos entre componentes (*FREEZE*, *SLIDE* y *STICK*)

SSID: *Slave Entity* se selecciona el componente que tenga el mayor número de elementos en la superficie de contacto.

MSID: *Master Entity* se selecciona el componente que contenga menos o el mismo número de elementos en la superficie de contacto que el componente *Slave*.

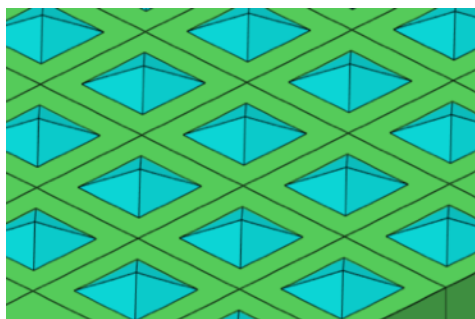


IMAGEN 9-7: ELEMENTOS CREADOS CON LA SUPERFICIE DE CONTACTO

En el modelo estudiado hay varios contactos usados que dependen de la relación entre los componentes. A continuación se explicarán los distintos tipos de contactos que se han realizado en este estudio usando distintos componentes como ejemplos.

Freeze: Piel fibra de carbono con núcleo de Rohacell 51.

Uno de los contactos usados habitualmente en el estudio de la configuración *sandwich* de fibra de carbono y núcleo de aluminio en forma de panal de abeja es el contacto *freeze*.

Este contacto fija los elementos de los dos componentes con un desplazamiento relativo de cero, la separación entre los elementos se mantiene fija y el deslizamiento entre los elementos es cero. El movimiento rotativo de la entidad *slave* es igual que el movimiento rotativo de la entidad *master*.

En este estudio el tipo de contacto *freeze* se usa para fijar la superficie de fibra de carbono creada con elementos *Shell* y el núcleo de *Rohacell 51* creado con elementos 3D.

La superficie del núcleo de *Rohacell 51* tiene los elementos de la superficie de contacto con dirección hacia el exterior, tal y como se puede observar en la Imagen 9-9, y los elementos de la superficie de la piel externa están orientados hacia el interior de la pieza garantizando que un contacto entre ellos.

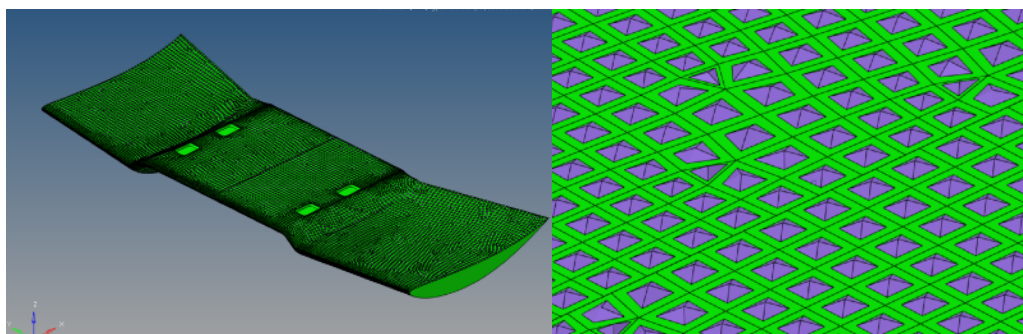


IMAGEN 9-8: SUPERFICIES DE CONTACTO DEL NÚCLEO DE ROHACELL 51

Slide: Parte central del tornillo con el agujero del monocasco y el soporte.

En la interacción entre la parte central del tornillo y los agujeros del monocasco y del soporte se usa el tipo de contacto *slide*. Esto se debe a que se usa la herramienta de pretensión en los tornillos y es necesario que la parte central pueda desplazarse.

La herramienta de pretensión, explicada en el siguiente ejemplo, está disponible en el programa HyperMesh y es muy útil para poder representar de una forma precisa el comportamiento de un tornillo y una tuerca.

Para garantizar que los tornillos no se desplazan de forma incontrolada durante la

pretensión las cabezas de los tornillos se fijan mediante el tipo de contacto *freeze*.

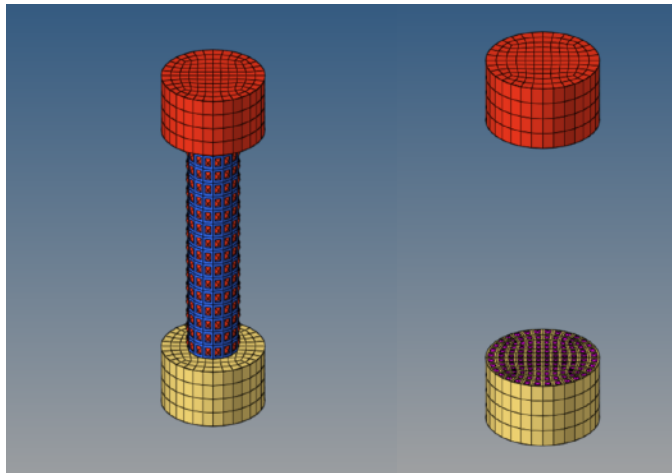


IMAGEN 9-9: SUPERFICIES DE CONTACTO DE LOS TORNILLOS

Pretensión: Pretensión de los tornillos.

El proceso de pretensión de los tornillos era un objetivo que se quería documentar en este proyecto ya que el proceso de pretensión no estaba muy bien comprendido y se tenían dudas de cómo se realizaba la simulación.

En primer lugar se crea una superficie de contacto en el medio del tornillo (Imagen 9-10) y mediante la herramienta de pretensión del programa *HyperMesh* se genera un tornillo 3D. También hay la opción de generar la pretensión mediante rígidos 2D pero en este trabajo se ha usado la opción de los tornillos 3D.

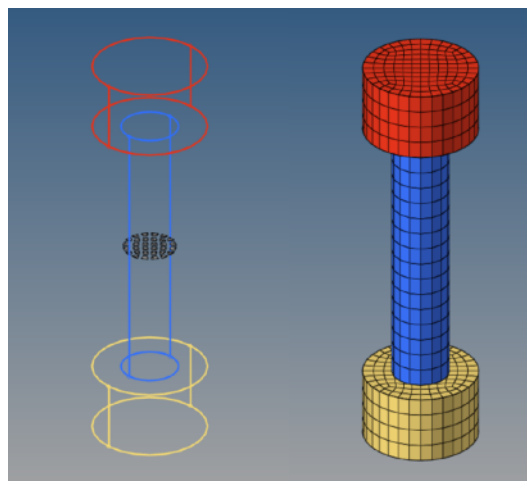


IMAGEN 9-10: SUPERFICIE DE CONTACTO EN EL CENTRO DEL TORNILLO

Después de generar los tornillos se tiene que seleccionar la fuerza de ajuste del tornillo que es el 75% de la carga de prueba del tornillo. Una vez seleccionada la fuerza se debe crear un *Load Steps* con la precarga y en el análisis se seleccionará la precarga como estado

inicial. En la imagen 9-11 se puede observar el desplazamiento y la tensión de los tornillos bajo la carga de pretensión.

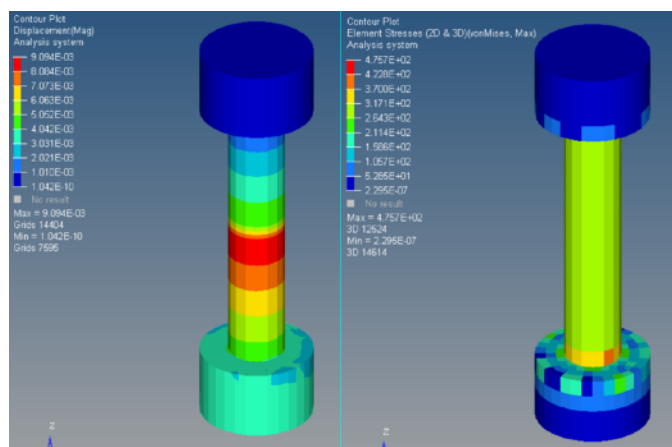


IMAGEN 9-11: DESPLAZAMIENTO (IZQUIERDA) Y TENSIÓN (DERECHA) DEL TORNILLO M5

9.4. Condiciones de contorno

Para la realización del estudio de todo el ensamblaje *front wing* incluyendo el soporte y la representación del monocasco se crea una única condición de contorno.

Todo el ensamblaje está flotando a partir de la sujeción del soporte mediante los tornillos con el monocasco. Se bloquea el movimiento de los 6 grados de libertad del componente que representa el monocasco representado con el color verde en la Imagen 9-12.

Las condiciones de contorno se aplican en los dos *Load Steps* de pretensión y en el caso de la aplicación de las cargas estudiadas.

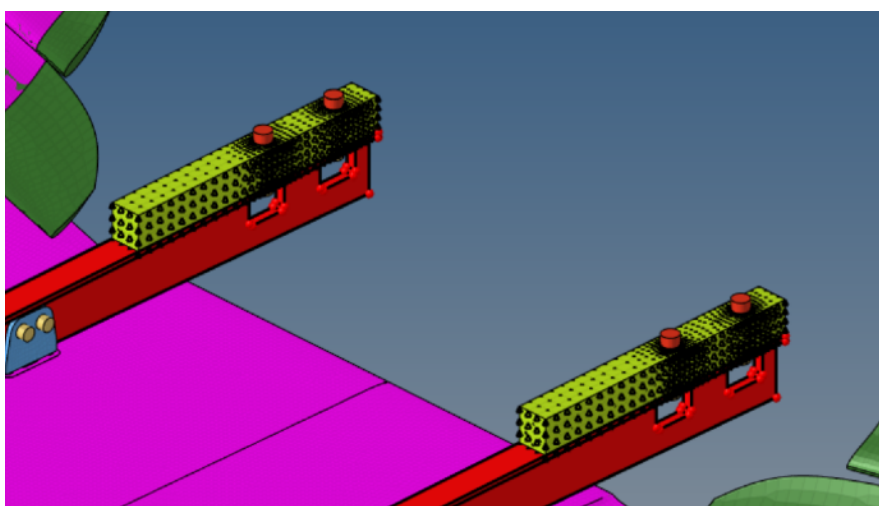


IMAGEN 9-12: NODOS DEL MODELO FIJOS EN LOS 6 GRADOS DE LIBERTAD

9.5. Materiales usados

Los materiales usados para el estudio de todo el conjunto *front wing* y para el soporte son los siguientes:

Material	Aluminio 6082 T6	Aluminio 7075 T6	Rohacell 51	Acero 8.8	Monocoque	Monolítico	Piel de fibra de carbono
Card Image	MAT1	MAT1	MAT1	MAT1	MAT1	MAT1	MAT8
E [MPa]	70000	72000	36000	800000	999999	70000	
G [MPa]	26400	27100			999999	5000	
NU	0,33	0,33	0,385			0,1	
ST*			1				
SC*			0,4				
SS*			0,4				
E1 [MPa]							57000
E2 [MPa]							57000
NU12							0,3
G12 [MPa]							5000
G1Z [MPa]							1
G2Z [MPa]							1

TABLA 9-1: PROPIEDADES DE LOS MATERIALES USADOS

9.6. Fuerzas ensayadas

Las fuerzas ensayadas para este trabajo reflejan los requisitos de la normativa de FSG y los requisitos mecánicos que tiene que cumplir el conjunto durante su uso en el monoplaza CAT13e.

Determinar las fuerzas ensayadas es de gran importancia para realizar un correcto rediseño de la pieza mediante la optimización topológica ya que el programa FEM recomendará un diseño según los requerimientos mecánicos que sean solicitados de la pieza.

* Tensión permitida en tracción, compresión y cizalla

Para cumplir con la normativa, tal y como se ha expuesto en el apartado 7.1, el elemento aerodinámico *front wing* tiene que soportar una fuerza de 200 N de fuerza repartida en una superficie de 225 cm² y no deformar más de 10 mm y tiene que poder soportar una fuerza puntual de 50 N y no deformar más de 25 mm.

En los dos casos se simula la aplicación de la fuerza en dirección vertical en el extremo del *main flap*, reflejando el posible caso de que por error se deje apoyado en el conjunto una bolsa o el caso de que alguien pise el *front wing* por error.

En el caso de los 200 N aplicados en dirección transversal representa la carga que sufrirá el *front wing* durante los evento dinámicos y también el posible caso de que el conjunto reciba un golpe en dirección transversal.

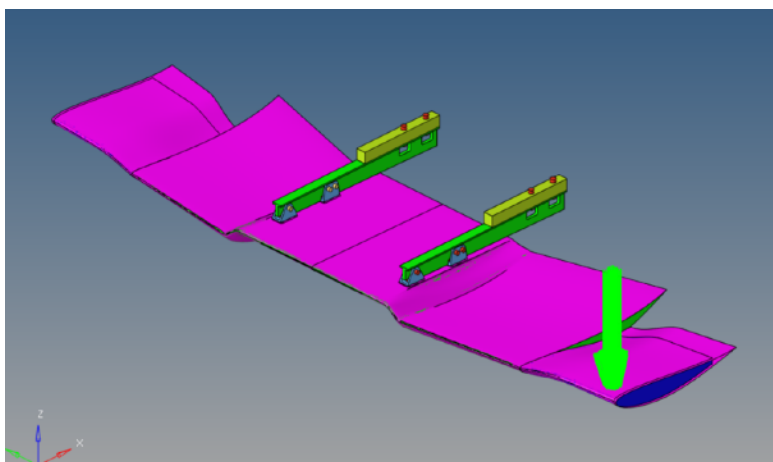


IMAGEN 9-13: CARGA DE 200 N APLICADA VERTICALMENTE

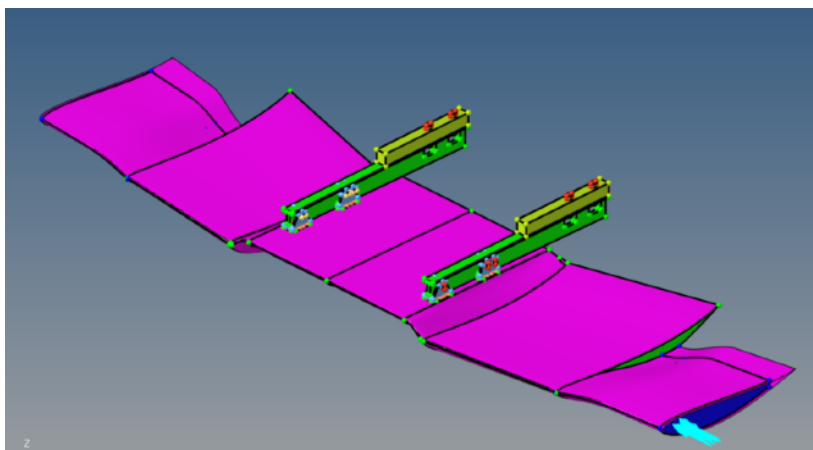


IMAGEN 9-14: CARGA DE 200 N APLICADA TRANSVERSALMENTE

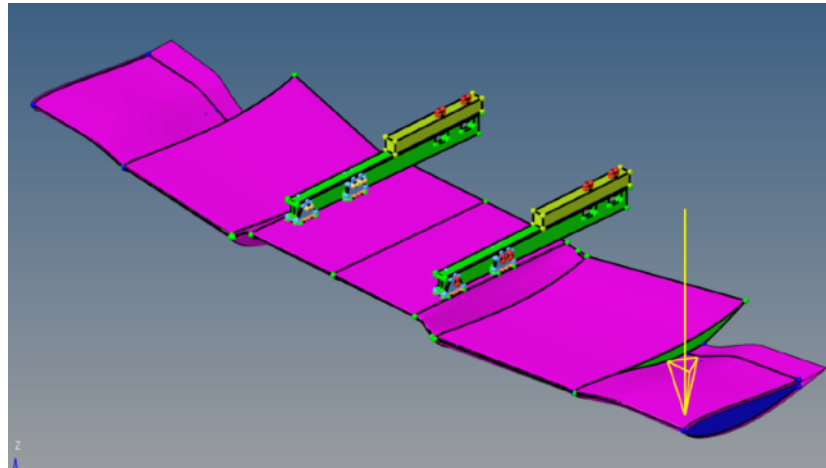


IMAGEN 9-15: CARGA DE 50 N APLICADA VERTICALMENTE

Por otro lado se ensaya un caso de máxima carga vertical que experimenta el conjunto *front wing* a una velocidad de 120 Km/h.

La carga vertical aplicada al conjunto según el departamento de aerodinámica es de 1200 N repartida nodalmente por encima de toda la superficie del alerón delantero (Imagen 9-16). La carga se reparte por el *main flap* y los otros *flaps*.

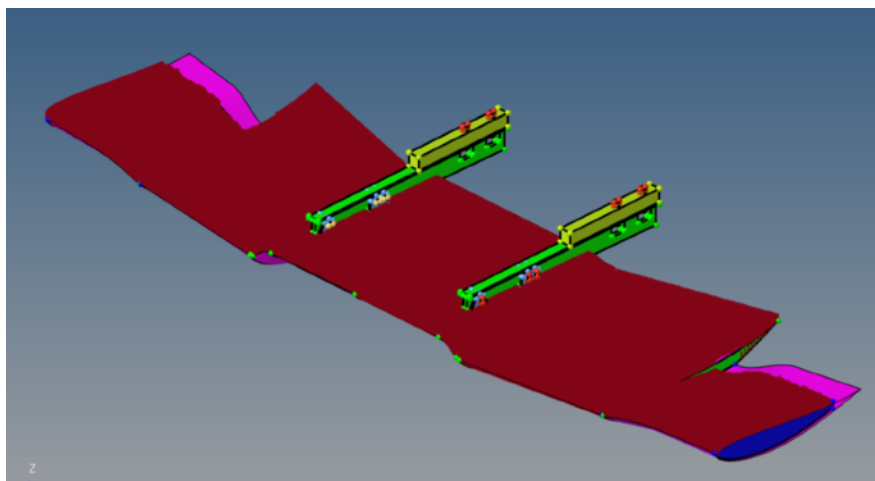


IMAGEN 9-16: 1200 N VERTICALES REPARTIDOS NODALMENTE POR EL MAIN FLAP

9.7. Resultados

Los valores que se estudian y miden con detalle son el desplazamiento total del conjunto y las tensiones que sufre el conjunto, con especial interés en las tensiones del soporte.

Se quiere garantizar que el conjunto cumple con los requisitos de la normativa en cuanto a desplazamiento y además se quiere mantener el conjunto *front wing* en la posición de diseño para que pueda tener el rendimiento deseado y generar la carga aerodinámica deseada.

Las tensiones estudiadas en el soporte son de vital importancia para garantizar la integridad del componente durante su uso.

9.7.1. Desplazamientos

Los desplazamientos máximos del primer modelo son inferiores a los desplazamientos máximos establecidos por la normativa así que el componente cumple con la normativa.

El desplazamiento máximo del conjunto bajo la aplicación de la carga máxima de 1200 N es de 4,77 mm, una deformación aceptable según el departamento de aerodinámico para que el conjunto *front wing* genere carga aerodinámica con normalidad.

Fuerza (N)	Dirección	Desplazamiento máximo (mm)	¿Cumple con normativa?
1200	Vertical	4,770	n/a
200	Vertical	3,766	3,766 mm < 10 mm
200	Transversal	0,5187	0,5187 mm < 10 mm
50	Vertical	0,7782	0,7782 mm < 25 mm

TABLA 9-2: DESPLAZAMIENTOS MÁXIMOS DE LAS VARIAS CARGAS ENSAYADAS

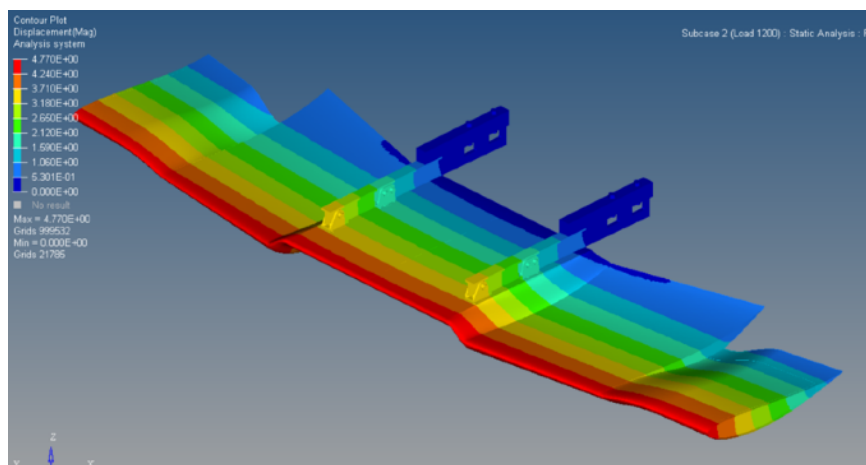


IMAGEN 9-17: DESPLAZAMIENTO DEL CONJUNTO SIMPLIFICADO (1200 N VERTICALES)

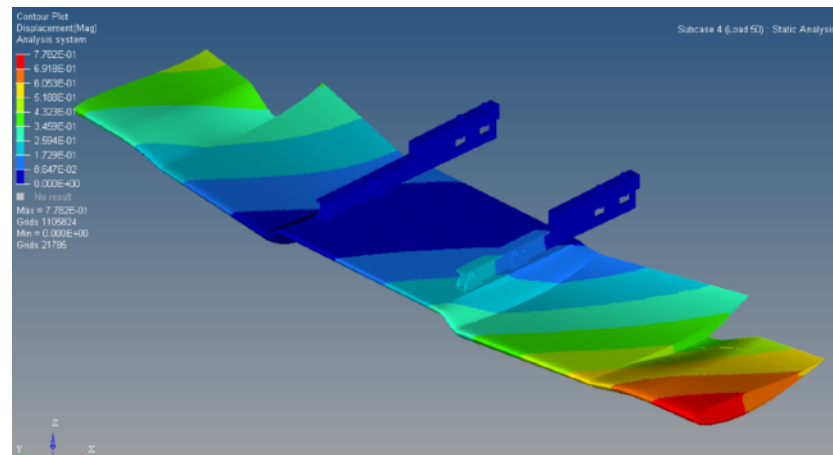


IMAGEN 9-18: DESPLAZAMIENTO DEL CONJUNTO SIMPLIFICADO (200 N VERTICALES)

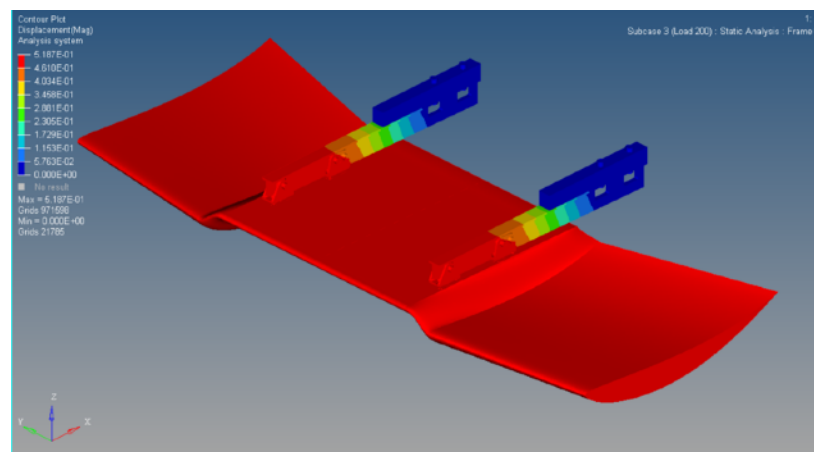


IMAGEN 9-19: DESPLAZAMIENTO DEL CONJUNTO SIMPLIFICADO (200 N TRANSVERSALES)

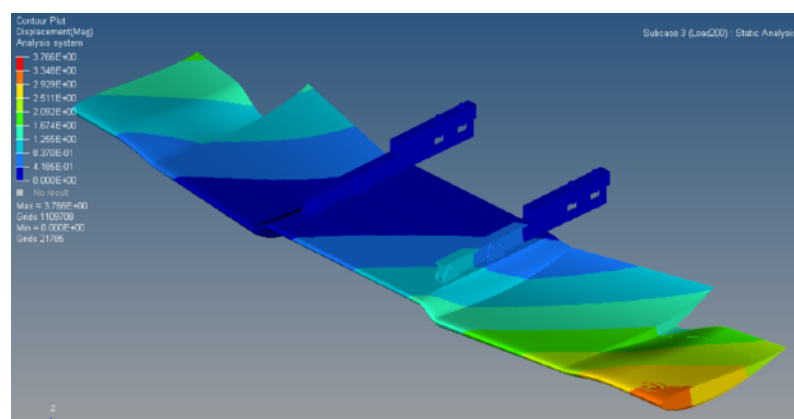


IMAGEN 9-20: DESPLAZAMIENTO DEL CONJUNTO SIMPLIFICADO (50 N VERTICALES)

9.7.2. Tensiones

Por otro lado también nos interesa el esfuerzo mecánico que requiere el soporte para garantizar que no sobrepase el límite elástico del aluminio 6082 T6.

Según la ficha técnica del proveedor *Alustock* el límite elástica mínimo garantizado para las láminas de aluminio 6082 T6 es de 265 MPa.

Según el estudio realizado mediante el software HyperMesh se ha identificado que el punto de máxima tensión (295 MPa) se encuentra alrededor del punto de sujeción frontal con el monocasco en el caso de 1200 N de carga vertical. La carga de 1200 N es el caso extremo de máxima carga y el soporte sufrirá una alta tensión en la zona de sujeción con el monocasco. La zona cercana del punto de sujeción del soporte con el monocasco es la zona crítica de la pieza y la zona que tendrá más probabilidad de sufrir una rotura y deformación.

Debido a que la carga de 200 N verticales es mas crítica que la carga de 50 N verticales no se ha realizado un análisis inicial para aligerar la velocidad computacional.

Fuerza (N)	Dirección	Tensión máxima Von Mises (MPa)	Criticalidad
1200	Vertical	295,4	Alta
200	Vertical	230,8	Media
200	Transversal	70,8	Baja

TABLA 9-3: MÁXIMAS TENSIONES DE LAS VARIAS CARGAS ENSAYADAS

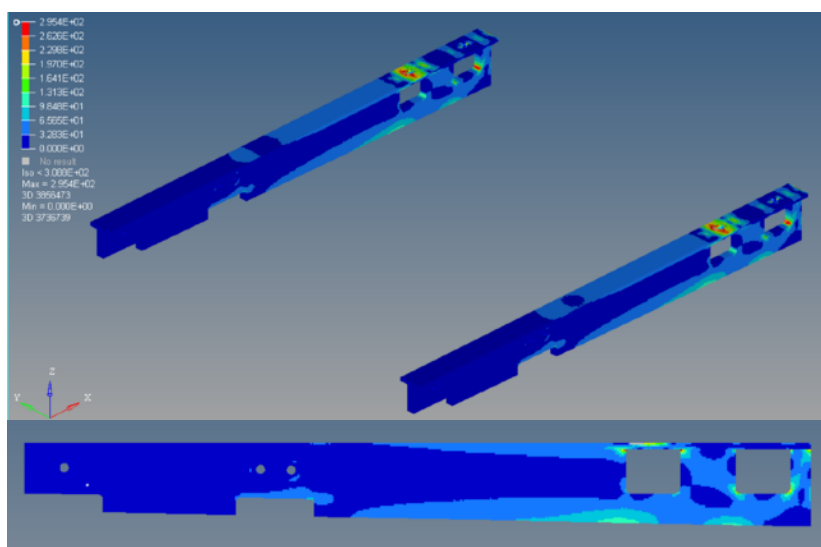
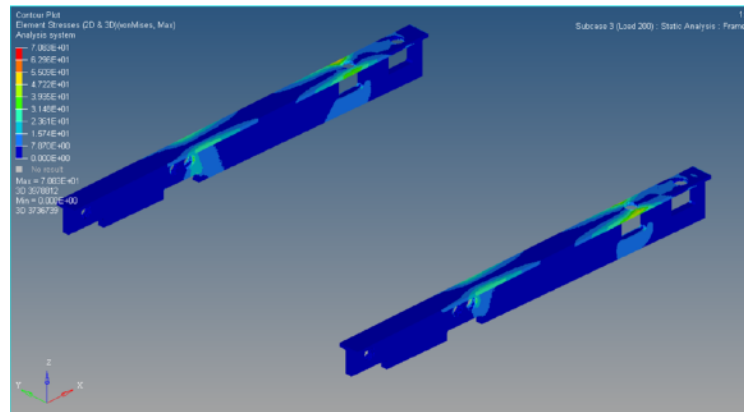
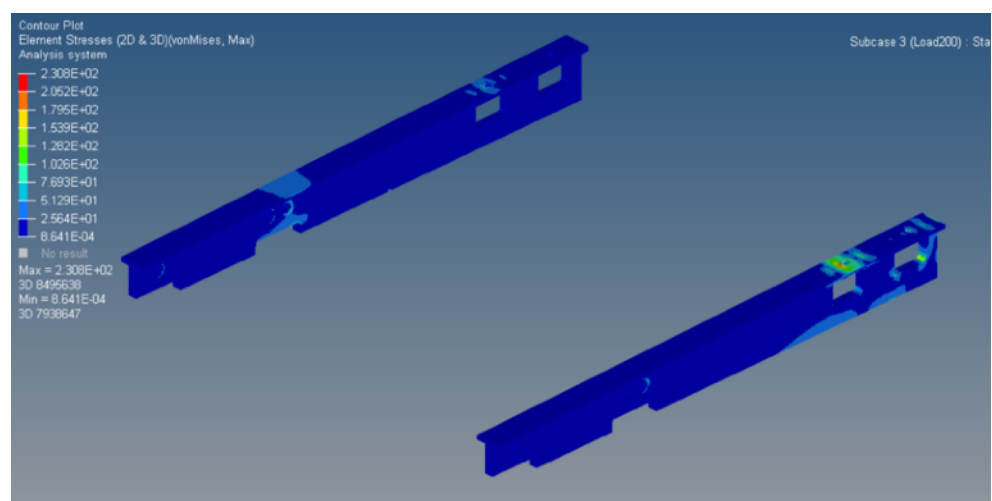


IMAGEN 9-21: TENSIÓN VON MISES (1200 N VERTICALES)

**IMAGEN 9-22: TENSIÓN VON MISES (200 N TRANSVERSALES)****IMAGEN 9-23: TENSIÓN VON MISES (200 N VERTICALES)**

10.OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DEL SOPORTE

10.1.Objetivos

El objetivo principal de la optimización topológica del soporte es reducir el peso para mejorar la relación peso/potencia del monoplaza.

Además de reducir el peso del conjunto también se quiere garantizar que el conjunto *front wing* mantendrá su posición con respecto al monocasco y el suelo. El objetivo de que el conjunto *front wing* se mantenga en su posición es para garantizar que el rendimiento sea el adecuado y de que no tenga contacto con el suelo por culpa de la flexión creada por la carga aerodinámica en el conjunto.

Por último, se quiere garantizar que el soporte resistirá las cargas aerodinámicas durante los eventos dinámicos de toda temporada.

10.2.Simplificación modelo

Debido a que la potencia computacional es limitada se ha tenido que simplificar el modelo inicial para realizar el análisis de la primera iteración del soporte: Pero para realizar la optimización topológica el modelo se tiene que simplificar de forma extrema.

Los elementos que forman parte del *main flap* se tienen que remover y solamente se puede estudiar un caso de carga. Se ha usado la carga de 1200 N porque es la más crítica y el soporte tiene que estar diseñado para poder soportar la carga más elevada.

La carga se aplicado en los insertos del conjunto *front wing* que interaccionan con los soportes U y que a su vez están atornillados con el soporte.

Para garantizar que la optimización topológica realice un cálculo correcto se tiene que comprobar que el cambio de posición de la carga de 1200 N no altera los resultados de forma significativa. En la imagen 10-1 se puede observar el modelo simplificado y la carga de 1200 N aplicada en los insertos del conjunto *main wing*.

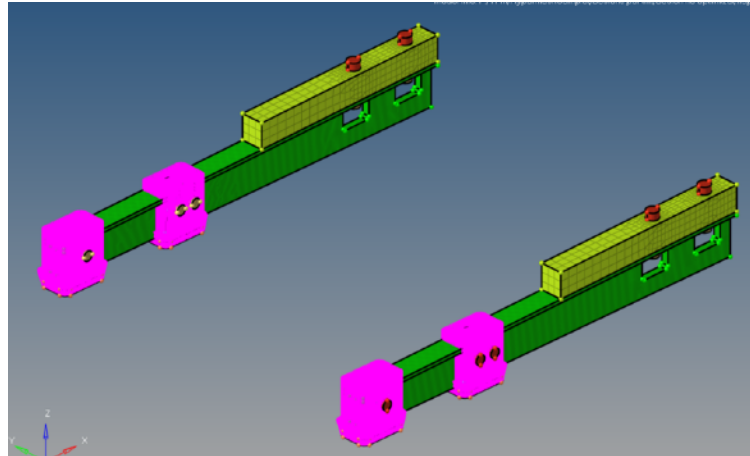


IMAGEN 10-1: MODELO SIMPLIFICADO PARA LA OPTIMIZACIÓN CON CARGA DE 1200N

En primer lugar tenemos un desplazamiento máximo de $3,699 \text{ mm}$ del soporte en el modelo completo y en segundo lugar tenemos un desplazamiento de $3,317 \text{ mm}$ del modelo simplificado para la optimización topológica. (Imagen 10-2)

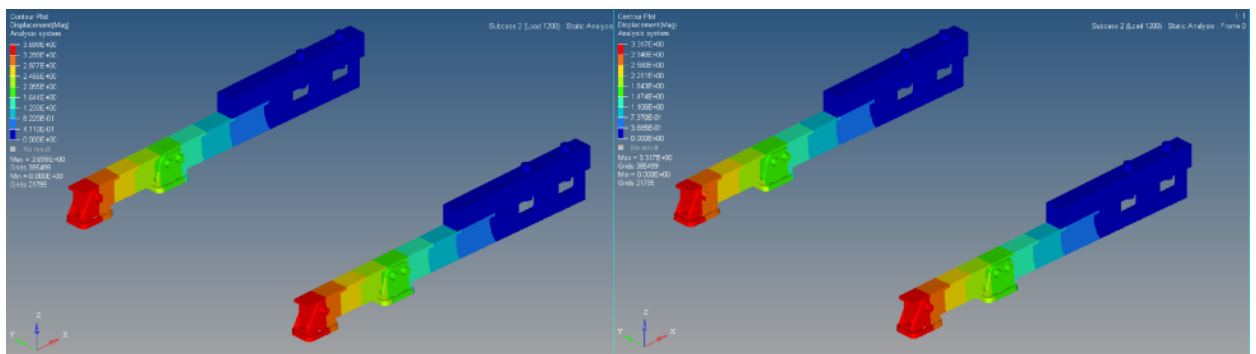


IMAGEN 10-2: DESPLAZAMIENTO MODELO SIMPLIFICADO 1 (IZQUIERDA) Y MODELO SIMPLIFICADO PARA LA OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA (DERECHA)

Con una diferencia entre los dos modelos de $0,382 \text{ mm}$ (10%) se tiene una elevada confianza de que el modelo simplificado refleja de una manera correcta el modelo completo y que la optimización topológica será correcta.

Además del desplazamiento también se han estudiado las tensiones sufridas en los modelos y tal y como se puede observar en las Imágenes 10-4 y 10-5 tienen una distribución similar a lo largo del soporte reafirmando que el modelo simplificado para la optimización es adecuado.

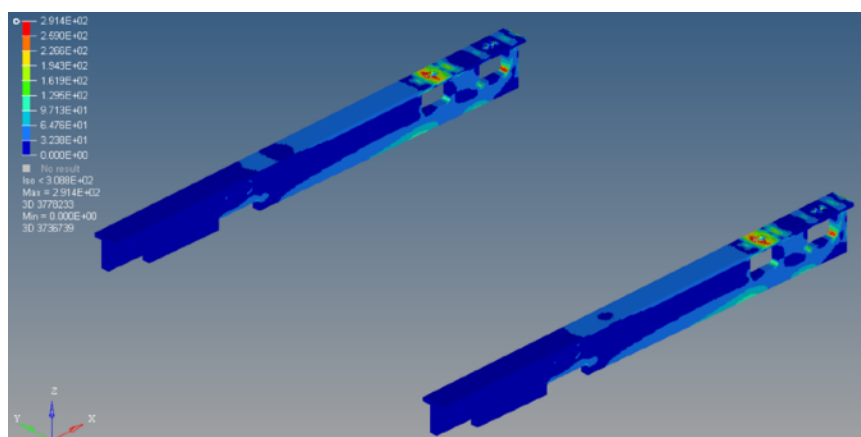


IMAGEN 10-3: TENSIÓN MODELO OPTIMIZACIÓN (1200 N VERTICALES)



IMAGEN 10-4: VISTA LATERAL DE LA TENSIÓN MODELO SIMPLIFICADO (1200 N VERTICALES)



IMAGEN 10-5: VISTA LATERAL DE LA TENSIÓN MODELO SIMPLIFICADO PARA LA OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA (1200 N VERTICALES)

10.3. Restricciones

El resultado de la optimización topológica se adaptará a las restricciones impuestas durante el cálculo. La restricción impuesta para la optimización topológica es una restricción de desplazamiento.

Se seleccionan varios nodos en el extremo del soporte y se limita el movimiento de estos nodos a un máximo de 7 mm .

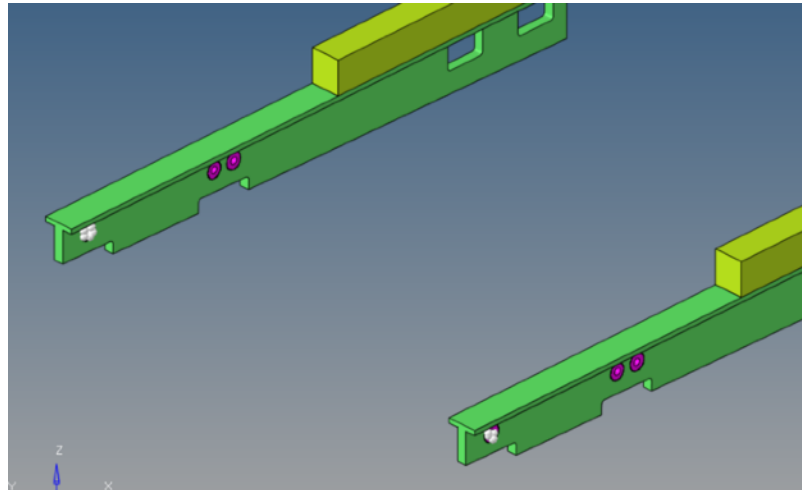


IMAGEN 10-6: NODOS SELECCIONADOS PARA LA RESTRICCIÓN DE DESPLAZAMIENTO DEL SOPORTE DURANTE LA OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA

Además se definen zonas en el soporte donde la optimización topológica no cambiará el diseño. Estas zonas, llamadas *No Design*, se definen para que los puntos de sujeción del soporte con el monocasco y con el *front wing* se mantengan inalteradas.

10.4.Resultados

Los resultados obtenidos de la optimización topológica presentan la densidad de elementos que debe tener cada zona del componente para cumplir con las cargas, condiciones de contorno y restricciones impuestas en la optimización.

El programa HyperView tiene la opción de visualizar la densidad de elementos desde 1 (elementos imprescindibles para el componente) hasta 0 (elementos prescindibles para el cumplimiento del caso de estudio) con el objetivo de reducir el peso del componente.

Con tal de obtener un diseño adecuado para que el punto de sujeción delantero esté conectado con el componente se tiene que definir un vaciado con un valor de 0,25. En las imagen 10-8 se puede observar la densidad de elementos propuestos por el software y en el apartado 11 se muestra el rediseño del componente teniendo en cuenta el resultado de la optimización topológica.

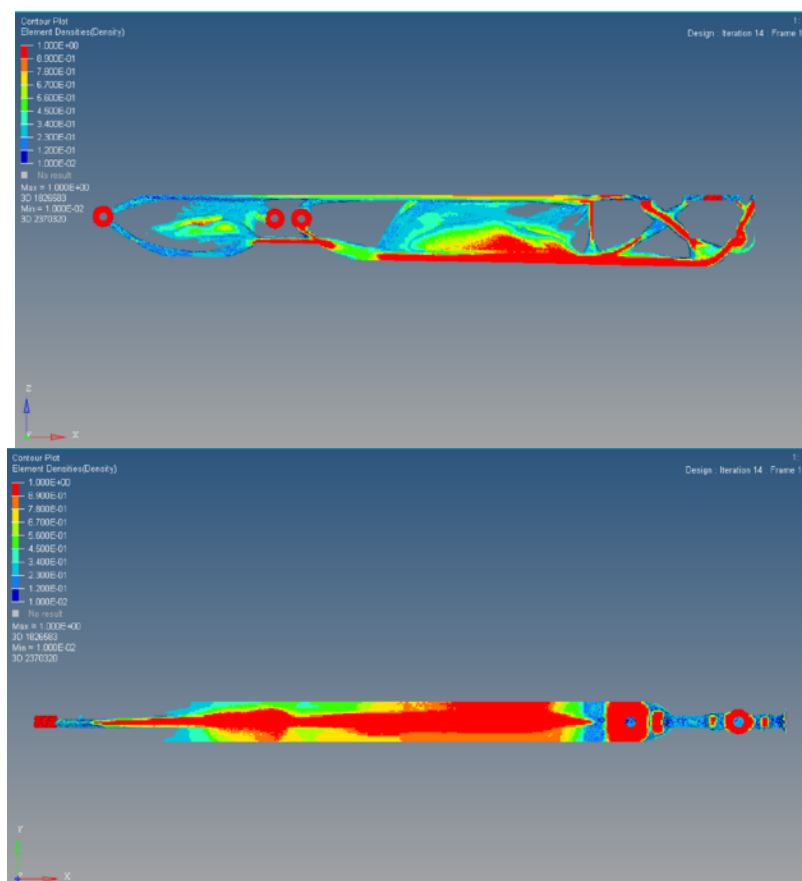


IMAGEN 10-7: OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DEL SOPORTE CON DENSIDAD DE ELEMENTO DE 0,25

Es oportuno mencionar que el cálculo de la optimización topológica para éste modelo tiene una duración de unas 72 horas para realizar 15 iteraciones.

11. REDISEÑO SOPORTE

A partir de los resultados obtenidos en la optimización topológica se importa el resultado al software de diseño CAD *SolidWorks* para diseñar el soporte teniendo en cuenta la densidad de elementos propuesta.

11.1. Geometría

La geometría final obtenida, según los resultados de la optimización topológica, se caracteriza por la reducción de material en la parte vertical del soporte y porque la parte superior del soporte no está alterada de forma significativa.

Se ha dejado la zona superior del soporte inalterada por dos motivos. En primer lugar, la densidad de los elementos según el cálculo de la optimización topológica es cercano a 1 y en segundo lugar se ha pensado en el proceso de fabricación del componente.

El componente se tiene que soldar así que el soldador necesita una área mínima para poder realizar una correcta soldadura.

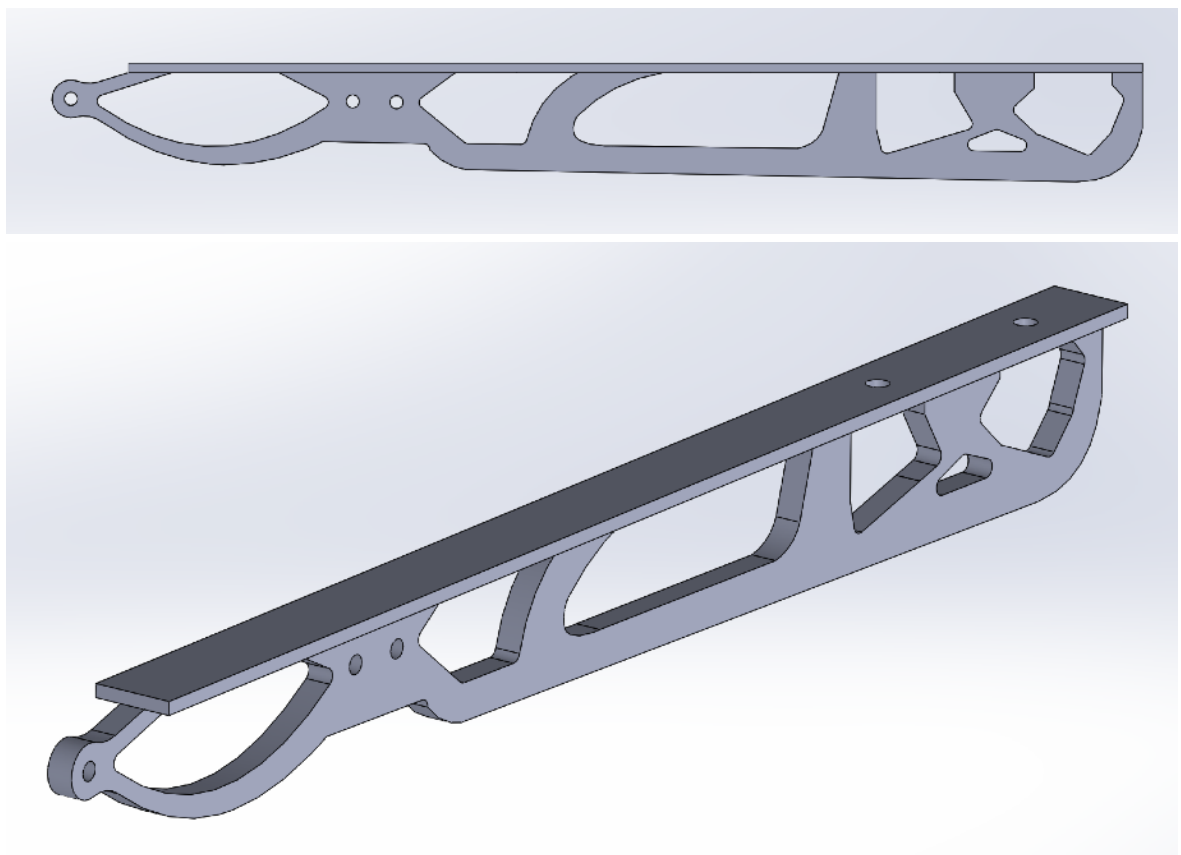


IMAGEN 11-1: MODELO CAD DEL SOPORTE OPTIMIZADO

11.2. Análisis modelo optimizado

Se simula el comportamiento del soporte con las cargas definidas en la normativa de FSG para garantizar que el rediseño del soporte cumple con la normativa.

Para el cálculo del conjunto *front wing* y el soporte bajo la carga de 1200 N se distribuye la carga según el estudio realizado por el departamento de aerodinámica donde el 60 % de la carga se reparte en el *main flap* y el 40% se reparte en los otros *flaps*.

11.2.1. Desplazamientos

Los desplazamientos máximos del conjunto *front wing* son menores que los desplazamientos máximos impuestos por la normativa de FSG bajo las cargas de 50 N puntuales y 200 N distribuidos.

Fuerza (N)	Dirección	Desplazamiento máximo (mm)	¿Cumple con normativa?
1200	Vertical	6,498	n/a
200	Vertical	8,877	8,877 mm < 10 mm
200	Transversal	0,8087	0,8087 mm < 10 mm
50	Vertical	2,205	2,205 mm < 25 mm

TABLA 11-1: DESPLAZAMIENTOS MÁXIMOS DEL CONJUNTO CON SOPORTE OPTIMIZADO

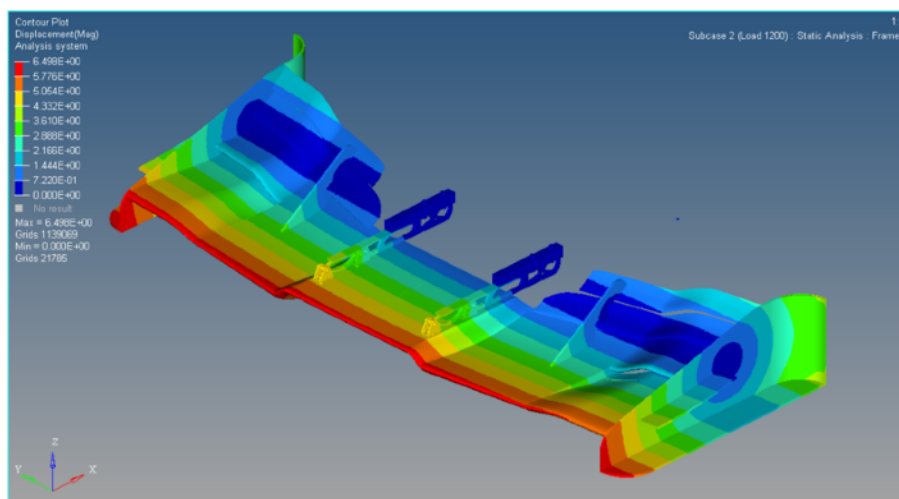
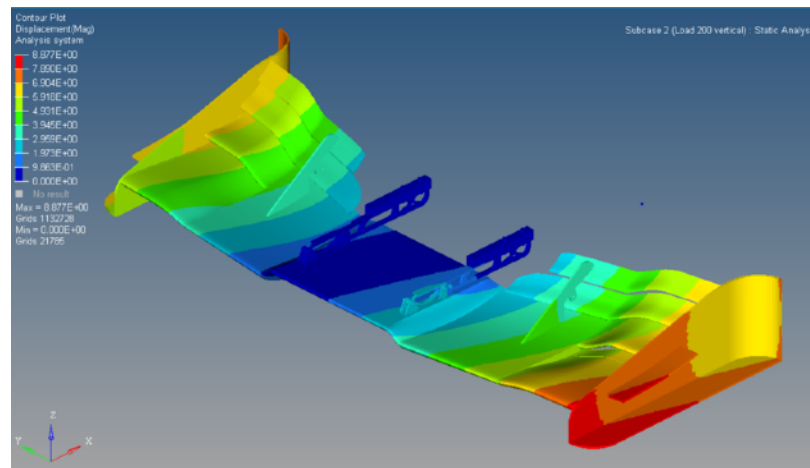
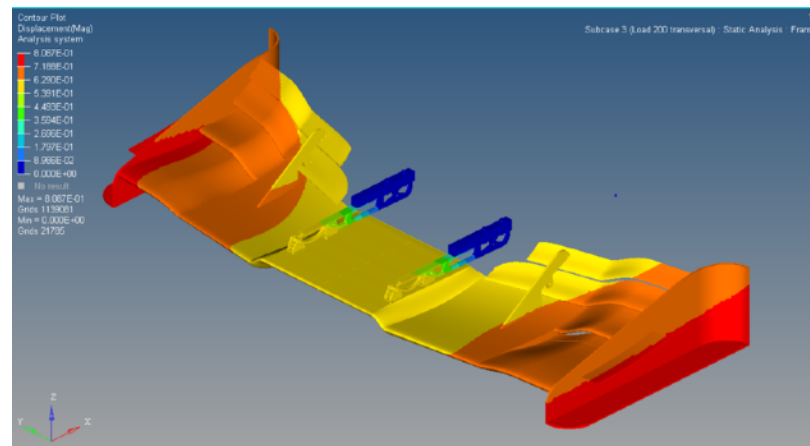
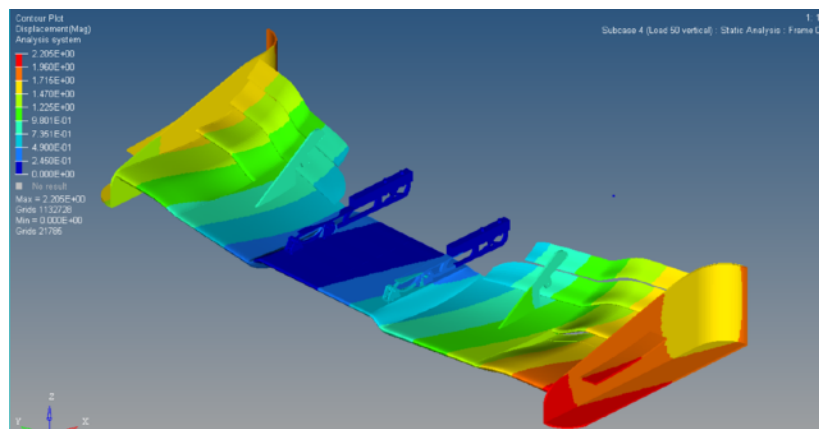


IMAGEN 11-2: DESPLAZAMIENTO DEL CONJUNTO (1200 N VERTICALES)

**IMAGEN 11-3: DESPLAZAMIENTO 200 VERTICAL****IMAGEN 11-4: DESPLAZAMIENTO 200 TRANSVERSAL****IMAGEN 11-5: DESPLAZAMIENTO 50 VERTICAL**

11.2.2. Tensiones

El otro resultado analizado son las tensiones generadas en los componentes, especialmente en el soporte. Las tensiones generadas en el soporte son de gran importancia para garantizar que el componente no se romperá durante la temporada.

Los resultados para las diferentes cargas analizadas se muestran en la Tabla 11-2. Bajo la carga máxima de 1200 N el soporte sufre una alta tensión localizada en la zona del tornillo frontal del monocasco. La tensión máxima es de 300,7 MPa que es superior a los 265 MPa de límite elástico mínimo que nos garantiza el fabricante. Es importante realzar que la carga de 1200 N es una carga muy crítica pero que aún así sería interesante realizar un ensayo del conjunto antes de ensayar el vehículo en pista.

Los requerimientos impuestos por la normativa tienen resultados de tensiones máximas por debajo del límite elástico del material del soporte aunque en el caso de 200 N aplicados verticalmente en el extremo del *main flap* el conjunto realiza una torsión que genera una tensión de 244,4 MPa.

Fuerza (N)	Dirección	Tensión máxima Von Mises (MPa)	Criticalidad
1200	Vertical	300,7	Alta
200	Vertical	244,4	Media
200	Transversal	70,4	Baja
50	Vertical	97,2	Baja

TABLA 11-2: TENSIONES MÁXIMAS DEL SOPORTE

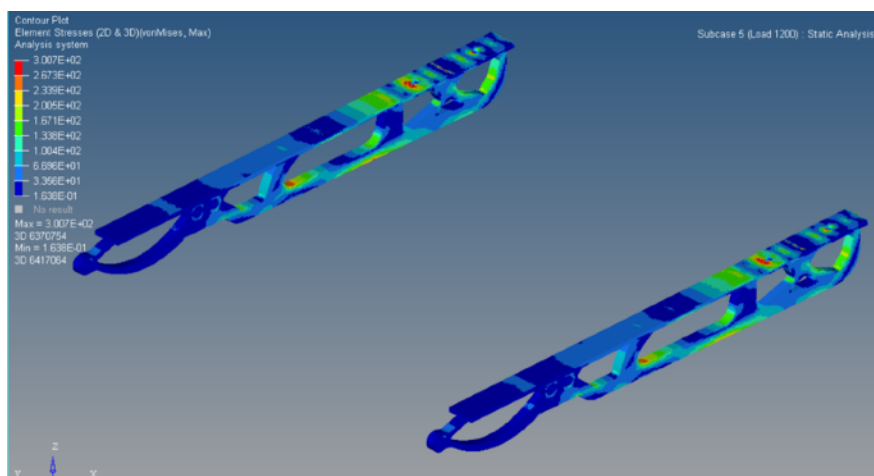


IMAGEN 11-6: TENSIÓN SOPORTE OPTIMIZADO (1200 N VERTICALES)

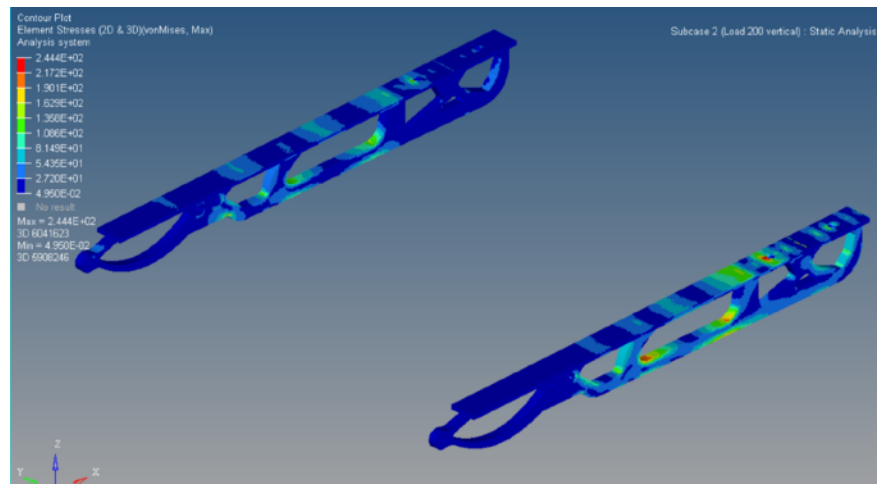


IMAGEN 11-7: TENSIÓN SOPORTE OPTIMIZADO (200 N VERTICALES)

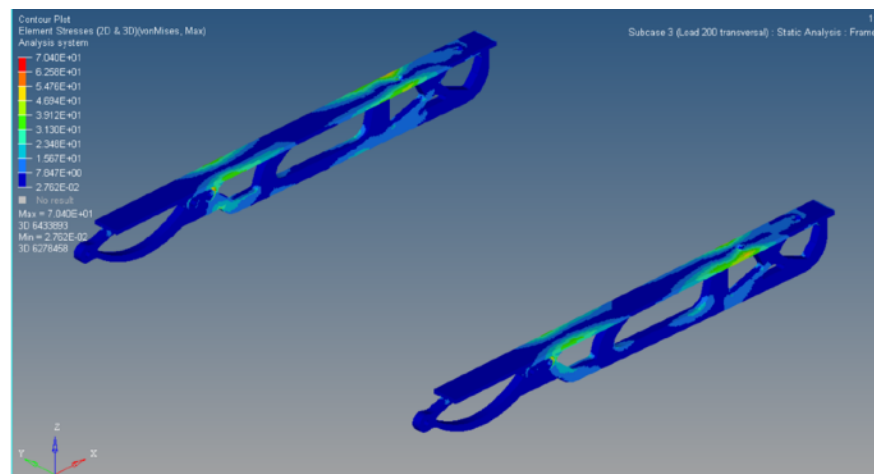


IMAGEN 11-8: TENSIÓN SOPORTE OPTIMIZADO (200 N TRANSVERSALES)

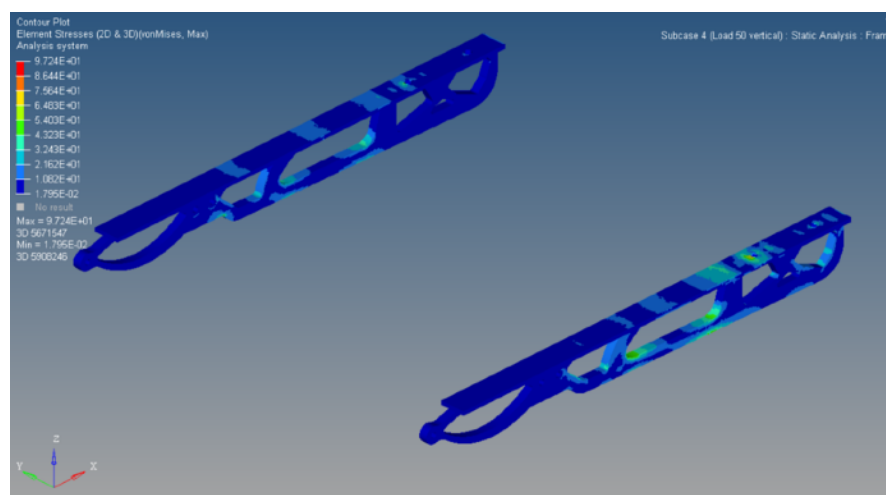


IMAGEN 11-9: TENSIÓN SOPORTE OPTIMIZADO (50 N VERTICALES)

Las tensiones en el conjunto *front wing* no son críticas teniendo en cuenta los materiales usados. La tensión más alta se encuentra en el caso de la carga de 1200 N verticales en el componente de fijación en forma de U. (Imagen 11-11).

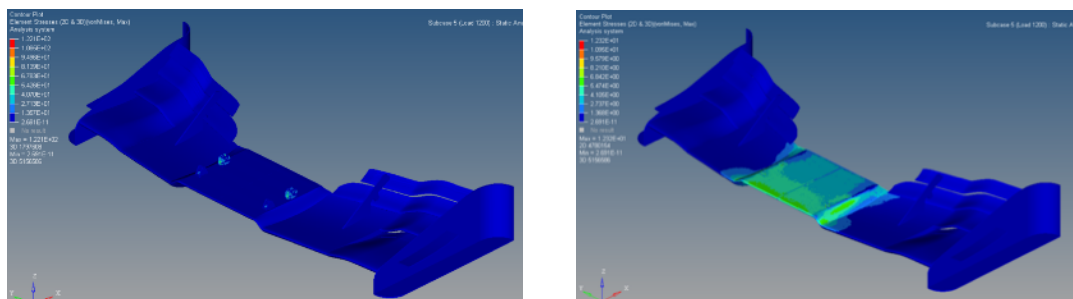


IMAGEN 11-10: TENSION EN EL CONJUNTO FRONT WING (IZQUIERDA) Y TENSION EN LA PIEL DEL CONJUNTO FRONT WING (DERECHA)

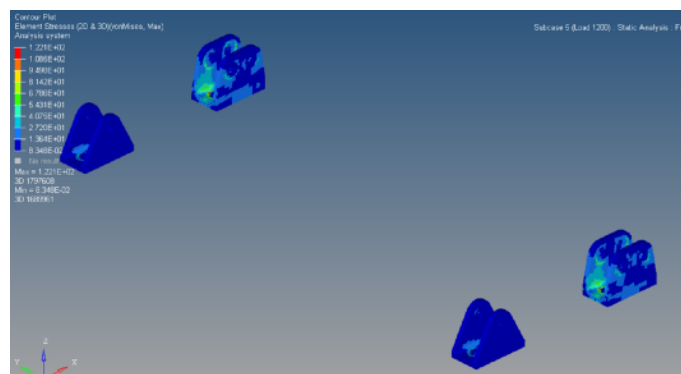


IMAGEN 11-11: TENSIONES EN LOS COMPONENTES U (CARGA DE 1200 N VERTICALES)

Las tensiones de los tres otros casos (200 N transversales y verticales y los 50 N verticales) no suponen ningún riesgo al conjunto. El componente que sufre una tensión de forma elevada es otra vez el componente de fijación en forma de U. Los componentes en forma de U no tienen un alto riesgo de romperse debido a que el material usado (Aluminio 7075) tiene un límite elástico muy por encima de las tensiones generadas.

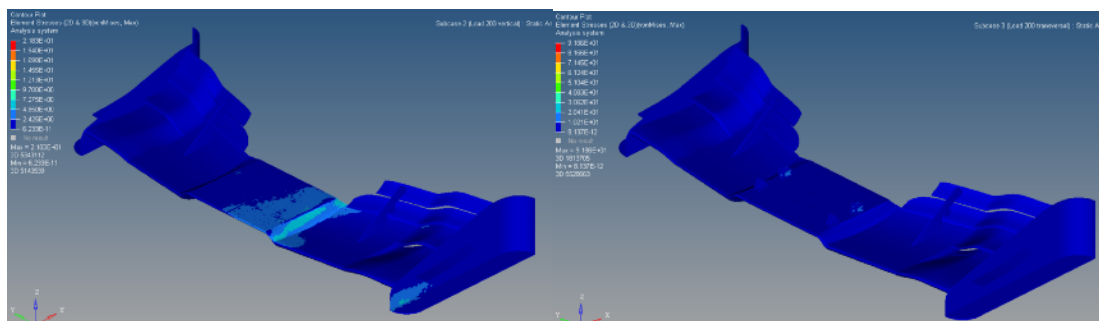


IMAGEN 11-12: TENSION 200 N VERTICALES (IZQUIERDA) Y 200 N TRANSVERSALES (DERECHA) EN EL CONJUNTO FRONT WING

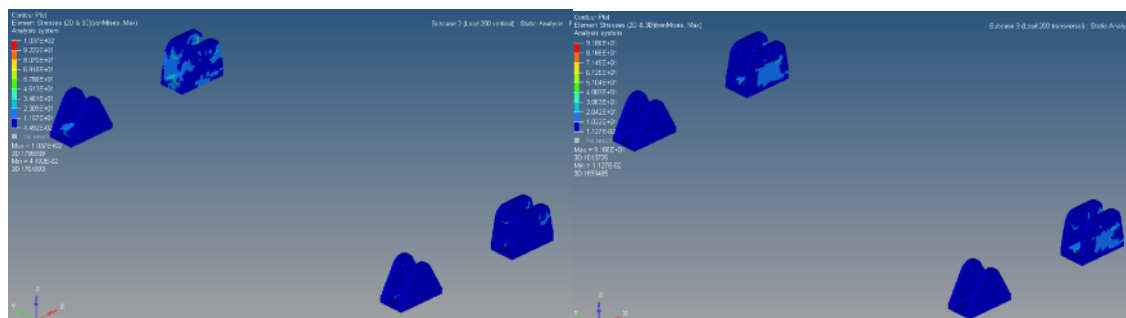


IMAGEN 11-13: TENSIÓN 200 N VERTICALES (IZQUIERDA) Y 200 N TRANSVERSALES (DERECHA) EN LOS COMPONENTES U

11.3.Reducción de peso

La reducción de peso del soporte optimizado es de 167,85 gramos. Supone una reducción de peso de 39,45% comparado con el modelo inicial que se ha analizado.

Diseño	Peso (gramos)
Inicial	425,26
Optimizado	257,41
Reducción total	167,85

TABLA 11-3: REDUCCIÓN DE PESO DEL SOPORTE OPTIMIZADO

12.SOFTWARE Y HARDWARE USADO

Software

SolidWorks 2017

Altair Hypermesh

Altair Optistrukt

Altair Hyperview

Sistema Operativo de 64 bits Windows 10

Hardware

MacBook Pro 2015

Procesador: 2,7 GHz Intel Core i5 de doble núcleo

Memoria: 8 GB RAM 1867 MHz DDR3

13.FUTURAS MEJORAS

La competición *Formula Student* destaca por ser una competición donde los estudiantes de diversas universidades alrededor del mundo usan tecnologías punteras para mejorar sus monoplazas. Siempre hay puntos de mejora y aspectos del monoplaza que pueden ser analizados para obtener mejores prestaciones y resultados en las competiciones.

Con el objetivo de mejorar, en este apartado se quieren exponer diversas opciones de mejora que podrían ser estudiadas en futuras temporadas o que se podrían tener en cuenta en el momento de diseñar futuros monoplazas.

13.1.Materiales compuestos

El uso de materiales compuestos en todo el monoplaza se debe a las altas propiedades mecánicas que ofrecen y al reducido peso de estos materiales. El uso de materiales compuestos en el mundo de la competición de automoción es común y un claro ejemplo puede ser en la competición Fórmula 1 donde los monoplazas están fabricados mayoritariamente con polímeros reforzados con fibra de carbono o *Kevlar*.



Debido a la excepcionalidad que nos encontramos no se ha podido realizar una temporada con normalidad y ha impedido el estudio y análisis de muchos componentes del monoplaza. Se tiene que recordar que todos los componentes que se instalan en el monoplaza son ensayados previamente de un modo u otro para garantizar su correcto funcionamiento durante la temporada.

IMAGEN 13-1: MONOCASCO FIBRA DE CARBONO DE UN FORMULA 1

Aunque se tenga un buen entendimiento del comportamiento del polímero reforzado con fibra de carbono aún hay muchos casos donde este material es desconocido para los miembros del equipo y es necesario realizar un ensayo para complementar el análisis mediante FEM.

Una de las propuestas para futuros monoplazas es fabricar el soporte del *Front Wing* con polímeros reforzados con fibras de carbono. Para ello la geometría del componente se tiene que rediseñar con tal de que el soporte pueda ser desmoldado y se pueda laminar. La geometría en forma de T es posible con aluminio porque se puede soldar con facilidad pero

con polímeros reforzados con fibra de carbono no es tan sencillo.

Se tiene que fabricar un molde que tenga la habilidad de ser laminado y que luego se pueda desmoldar una vez la pieza esté curada.

13.2.Geometría

El monoplaza CAT13e en gran parte está diseñado con una geometría similar al CAT12e debido a que los moldes de fabricación son los mismos. El uso de los mismos moldes se debe a que la fabricación de moldes nuevos tiene un elevado coste y que la política del equipo es que la creación de un nuevo diseño cada año conlleva una dificultad elevada.

El uso de los mismos moldes en el segundo año permite a los miembros del equipo centrarse en mejorar componentes específicos e investigar futuras mejoras con las que poder experimentar. Pero también hay puntos negativos como la limitación de ciertos rediseños que no se pueden adaptar a la geometría del monocasco o de los componentes aerodinámicos.

En el caso del soporte del conjunto *front wing* la limitación de espacio y la geometría del front wing y monocasco son factores muy limitantes para el rediseño del soporte.

La geometría con sección del soporte se ha diseñado en forma de T para poder acomodar los puntos de soporte diseñados en el *main wing* mediante los componentes de aluminio en forma de U y la zona de anclaje en el monocasco localizada en la parte inferior delantera del monocasco.

Además de la limitación de los puntos de anclaje también hay la limitación de espacio para colocar los insertos en el monocasco debido al posicionamiento de los pedales de frenado y aceleración.

Si se tiene en cuenta el soporte en el diseño de futuros monoplazas se puede dejar más espacio en el monocasco o bien cambiar el modo de sujeción con el *main wing*.

Se ha comentado anteriormente el diseño del soporte mediante polímeros reforzados con fibras de carbono pero tenía la complicación de la geometría con sección en forma de T.

Una posible solución para este problema es diseñar el soporte con sección en forma de L. Esto permite la sujeción con los componentes en forma de U de aluminio del *main wing* y la sujeción con el monocasco en la zona inferior. Además el molde para crear un componente con sección en forma de L es sencillo y ya se ha fabricado en la temporada 2018/2019 para los soportes del *front wing*.

El único limitante en este caso es el posicionamiento de los puntos de anclaje con el monocasco que con la configuración actual están limitados por culpa de los insertos de los

pedales de frenado y aceleración.

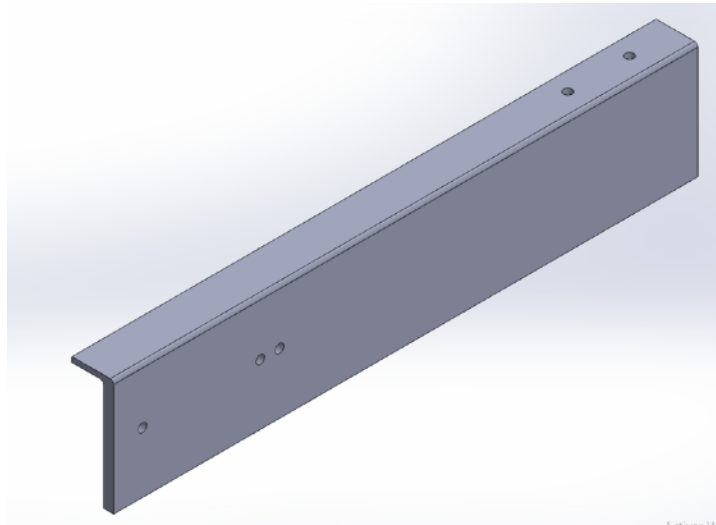


IMAGEN 13-2: POSIBLE REDISEÑO SOPORTE CON SECCIÓN L

13.3.Fabricación aditiva

El último método para mejorar el diseño del soporte del conjunto *front wing* es la fabricación del soporte mediante técnicas de fabricación aditiva.

Actualmente el equipo dispone de impresoras 3D de polímero fundido del tipo PLA o ABS. Las impresoras tienen un uso muy importante dentro del equipo para poder verificar diseños y para fabricar pequeños componentes con geometrías complejas.

Aunque la fabricación mediante las impresoras 3D, que están a disposición del equipo, de componentes para el monoplaza es habitual normalmente estos componentes no requieren un alto esfuerzo mecánico. Para el caso del soporte del conjunto *front wing* las cargas aplicadas sobre el soporte son elevadas y los polímeros PLA o ABS depositados por fundición de hilo no tienen la resistencia mecánica suficiente para soportar la cargas aplicadas en este componente.

Con tal de lograr una geometría compleja con un material suficientemente resistente se ha llegado a la técnica de fabricación mediante sinterización con polvo de aluminio. Esta técnica permite el diseño de un soporte con una geometría compleja sin tener que estar limitados a la geometría de una plancha cortada por láser. Se podría generar un componente con vaciados internos y adaptable a las restricciones de los puntos de sujeción previamente diseñados. Además el impacto medioambiental de esta técnica es bajo debido a que todo el polvo que no se usa se puede recuperar inmediatamente sin la necesidad de un proceso de reciclaje.

14.IMPACTO MEDIOAMBIENTAL

La fabricación del monoplaza CAT13e tiene un alto impacto medioambiental debido al uso en gran parte de los materiales compuestos usados en el monoplaza. Los materiales compuestos como el polímero reforzado con fibras de carbono o el polímero reforzado con *kevlar* tienen propiedades muy deseadas en los vehículos de competición (alta resistencia mecánica, peso bajo, retardante de llama) pero su fabricación es altamente contaminante.

La fabricación de estos componentes tienen un proceso químico complejo que genera muchos subproductos nocivos para la salud y para el medio ambiente que en gran medida no se pueden reciclar. Los materiales y procesos usados para la fabricación del *front wing* son los siguientes:

Durante el proceso de creación de los moldes para todos los componentes se usan bolsas de vacío, malla de plástico, *airtech*, tubos de infusión, *econo breaker*, *sangrador* P21 y conexiones de plástico que son de uso único. Todos los elementos usados para la infusión quedan impregnados con resina *epoxy* y no se pueden reciclar.

Antes de poder laminar la fibra de carbono los moldes se tienen que condicionar para poder obtener un buen acabado superficial y para poder desmoldar las piezas. Primero el molde se tiene que limpiar con acetona y luego se le aplica un producto tapaporos llamado Frekote B15. El segundo producto que se le aplica al molde para que se pueda desmoldar la pieza con facilidad es el Frekote 770. Durante el uso de los dos productos el uso de protección personal es imprescindible ya que los productos de acondicionamiento del molde son nocivos e irritantes.

La fibra de carbono prepreg se tiene que conservar en un congelador para evitar la degradación de las propiedades mecánicas y además normalmente viene enrollada sobre sí misma con una protección de plástico para evitar que las fibras se peguen entre sí y para que la fibra no se ensucie.

El plástico protector se retira en el proceso de fabricación y se recicla, es de los pocos plásticos usados durante el proceso de fabricación que se puede reciclar con facilidad.

Para lograr que las diferentes partes de los componentes del *front wing* se adhieran de forma correcta se usa un tejido poroso llamado *peel-ply* que se lamina encima de la superficie de fibra de carbono y que luego se retira para dar rugosidad a la superficie. Esta rugosidad facilita a la unión de las diferentes partes del componente.

Durante el proceso de curado de las partes con fibra de carbono se coloca un film sangrador y una manta que cubre toda las superficies de la pieza. El film sangrador permite que el exceso de resina se retire de la fibra de carbono y la manta absorbe el exceso de resina. Para lograr moldear la pieza según el molde se usa una bolsa de vacío que se sella

mediante el uso de *tacky tape*.

Los materiales usados para el proceso de curado (bolsa, *tacky tape*, *peel-ply*, sangrador, *econo breaker*) no se pueden volver a rehusar y se tienen que desechar inmediatamente porque la resina queda impregnada en todos los materiales durante el proceso de curado.

Por otro lado se tiene que ir con cuidado porque durante los procesos de fabricación de los componentes se generan gases nocivos y se manejan materiales corrosivos e irritantes.

En primer lugar el uso de mascarillas, gafas de protección, guantes y monos de trabajo son altamente recomendables. Los espacios de trabajo para el mecanizado de los componentes y la laminación de la fibra de carbono tienen que estar bien aireados para evitar la concentración de polvos en suspensión y gases nocivos.

El proceso de reciclado del componente *front wing* es muy limitado debido a que hay una gran cantidad de materiales que están unidos.

Aún así para poder reciclar el polímero reforzado con fibra de carbono se tiene que descomponer térmicamente mediante el proceso térmico de depolimerización en un ambiente libre de oxígeno. La captura del carbono y de los monómeros es posible y se puede rehusar.

También se puede triturar la pieza de fibra de carbono a baja temperatura para recuperar las fibras de carbono. Este proceso acorta la longitud de las fibras y reduce las propiedades mecánicas del material.

Para la fabricación del soporte el impacto medioambiental es menor que el conjunto *front wing* debido a que el material utilizado para el soporte es aluminio que aunque el proceso para crear este material es altamente energético su potencial negativo de final de vida menor. (Gráfico14-1)

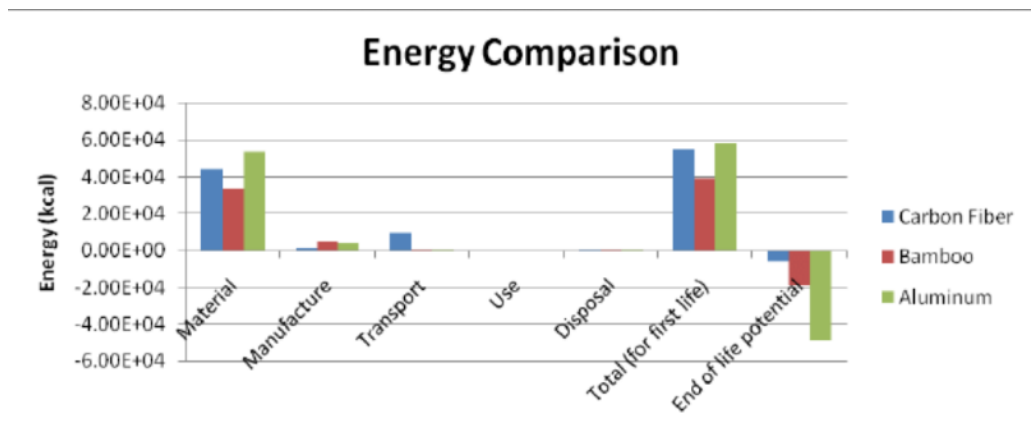


GRÁFICO 14-1: ENERGÍA USADA EN VARIOS MATERIALES DE FABRICACIÓN [3]

Un potencial negativo significa que el aluminio puede ser reciclado y usado con un coste energético muy inferior comparado con el primer componente creado con el mismo material. (Gráfico 14-2)

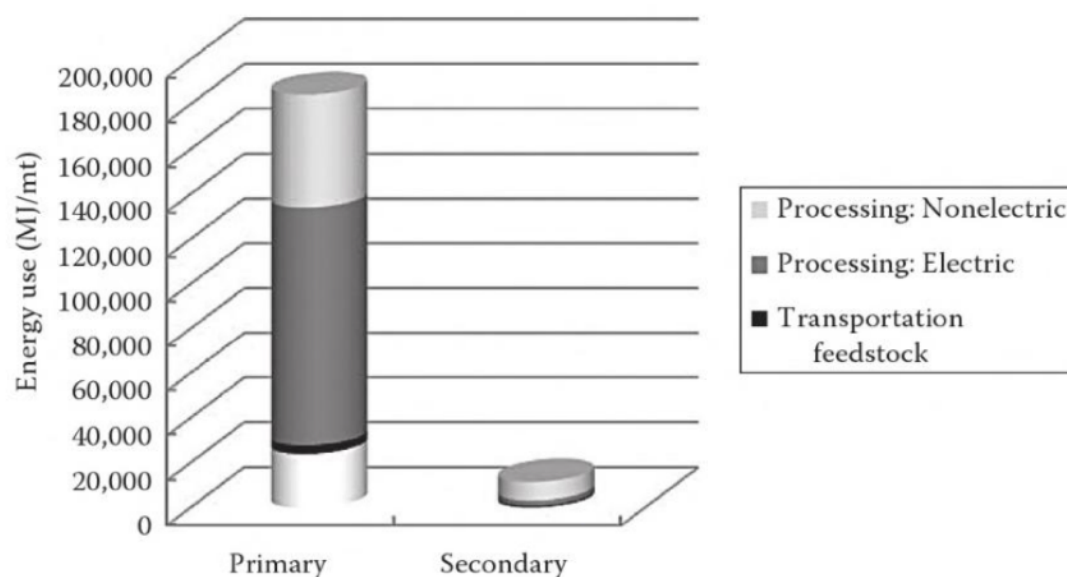


GRÁFICO 14-2: ENERGÍA CONSUMIDA PARA EL PRIMER Y SEGUNDO USO DEL ALUMINIO [4]

15. ANÁLISIS DE LOS COSTES

El equipo ETSEIB Motorsport Formula Student es una organización sin ánimo de lucro y los objetivos principales son que los miembros aprendan a trabajar en equipo y aprendan métodos de diseño, fabricación y ensayo del mundo de la automoción.

El presupuesto del proyecto para el diseño, fabricación y ensayo del monoplaza es ajustado así que los miembros del equipo tienen el reto añadido de encontrar patrocinadores, encontrar descuentos o usar cualquier método para reducir los costes para la construcción del monoplaza.

Hay dos costes que se tendrán en cuenta para calcular los costes totales para el conjunto *front wing* y el soporte: coste material y coste humano/diseño.

El valor de los dos costes se separarán en el precio pagado por el equipo y el precio real que tiene el coste sin la ayuda de los patrocinadores (*Nexus projectes*, *SEAT*, *Altair*, *MelComposites*, *CMI*).

15.1. Coste material

Material	Precio/unidad	Unidades	Precio pagado (€)	Precio real (€)
SolidWorks	6.600 €/licencia	1 licencia	0	6600 €
Altair HyperWorks	3.180 €/licencia	1 licencia	0	3180 €
Madera MDF	41 €/m ²	5 m ²	205 €	205 €
Fresado modelo	41 €/h	17 horas	0	697 €
Gelcoat y polvo aluminio	48 €/u	1 unidad	48 €	48 €
Lija	0,8 €/u	50 unidades	40 €	40 €
Masilla	31 €/u	1 unidad	31 €	31 €
Fibra de vidrio	9 €/m ²	25 unidades	225 €	225 €
Resina infusión	140 €/u	1 unidad	140 €	140 €
Malla distribución	1,40 €/m ²	5 m ²	0	7 €
Bolsa vacío	4 €/m ²	35 m ²	0	140 €
Tacky tape	2 €/m	40 metros	0	80 €
Autoclave	88 €/h	25 horas	0	2200 €

Fibra de carbono	83 €/m ²	8 m ²	664 €	664 €
Film sangrador	0,94 €/m ²	10 m ²	0	9,4 €
Manta absorción	1,02 €/m ²	16 m ²	0	16,63 €
Nomex	35,40 €/m ²	0,02 m ²	0,8 €	0,8 €
Rohacell 51	105 €/m ²	2 m ²	210 €	210 €
Herramientas mecanizado	25 €/juego	1 juego	25 €	25 €
Aluminio	85 €/m ²	0,6 m ²	51 €	51 €
Corte láser	35 €/hora	0,5 horas	0	17,5 €
TOTAL			1639,8 €	14.587,33 €

15.2.Coste humano/diseño

El coste humano pagado para este proyecto es de 0 € debido a que los miembros del equipo ETSEIB Motorsport son estudiantes que no tienen sueldo y los operarios y técnicos de las autoclaves, soldadores y programadores de las empresas externas son patrocinadores del equipo que prestan sus servicios de una forma gratuita.

Proceso	Precio/unidad	Unidades	Precio pagado (€)	Precio real (€)
Operario Autoclave	12,65 €/h	25 horas	0	316,25 €
Ingeniero diseño	18,23 €/h	750 horas	0	13.672,5 €
Cálculo computacional	0,05 €/h	25.200 horas	0	1260 €
Soldador	75 €/h	1 hora	0	75 €
Operario fabricación	11,83 €/h	750 horas	0	8872,5 €
TOTAL			0	24.196,25 €

El coste para los operarios se adhiere al coste colectivo BOE-A-2013-3750 (Industria química) donde se especifica que un trabajador especializado en la transformación de materiales compuestos también se adhiere a este convenio colectivo.

El coste de ingeniero diseño, soldador y operario de fabricación son costes aproximados reflejando los costes reales de estas posiciones en la industria.

El coste del cálculo computacional viene dado por el CSUC a un precio de 50 € por 1000 horas de cálculo.

15.3.Coste total

El coste total del conjunto *front wing* y el soporte es el siguiente: (separado con y sin patrocinadores)

Coste total pagado por el equipo	
Coste material	1639,8 €
Coste humano/diseño	0 €
TOTAL	1639,8 €

El coste total pagado directamente por el equipo ETSEIB Motorsport es de 1.639,8 € para el conjunto *front wing* y el soporte.

Gracias a la ayuda de los patrocinadores y de las empresas que apoyan al proyecto el coste es muy reducido si lo comparamos con el coste real del conjunto que es de 38.783,58 €.

Coste total real sin patrocinadores	
Coste material	14.587,33 €
Coste humano/diseño	24.196,25 €
TOTAL	38.783,58 €

16. Planificación

La planificación de diseño, análisis y fabricación del monoplaza CAT13e es de vital importancia para poder tener el monoplaza listo para las competiciones de verano.

La planificación del equipo ETSEIB Motorsport se basa en 3 fases que son: Diseño, Fabricación y Testing. Para este apartado se han planificado las dos primeras fases para el soporte del conjunto *front wing*.

Debido a la pandemia mundial del COVID 19 las fechas se han estimado basándose en temporadas anteriores.

El inicio del proyecto es en el mes de Septiembre revisando documentación de la temporada anterior y fijando objetivos para el departamento de Body. El departamento empieza a estudiar posibles mejoras y qué opciones tenemos para mejorar el monocasco considerando el presupuesto de la sección.

El problema del soporte se empieza a trabajar a principios de Octubre con la creación de un diseño y análisis inicial. La optimización se realiza antes de los exámenes finales de la universidad y el rediseño del soporte se hace antes de la entrega de los documentos SES+IAD.

Después de la entrega de los documentos la sección sigue trabajando en el diseño del monocasco pero se entra en la fase de Fabricación. La mayoría del tiempo se usa para la fabricación del monocasco así como todos los componentes que forman parte del monoplaza.

En el caso del soporte el aluminio comprado se lleva a las distintas empresas para realizar el proceso de fabricación del soporte.

A continuación se puede observar el diagrama de Gantt con las fechas aproximadas de la temporada para el soporte del conjunto *front wing*.

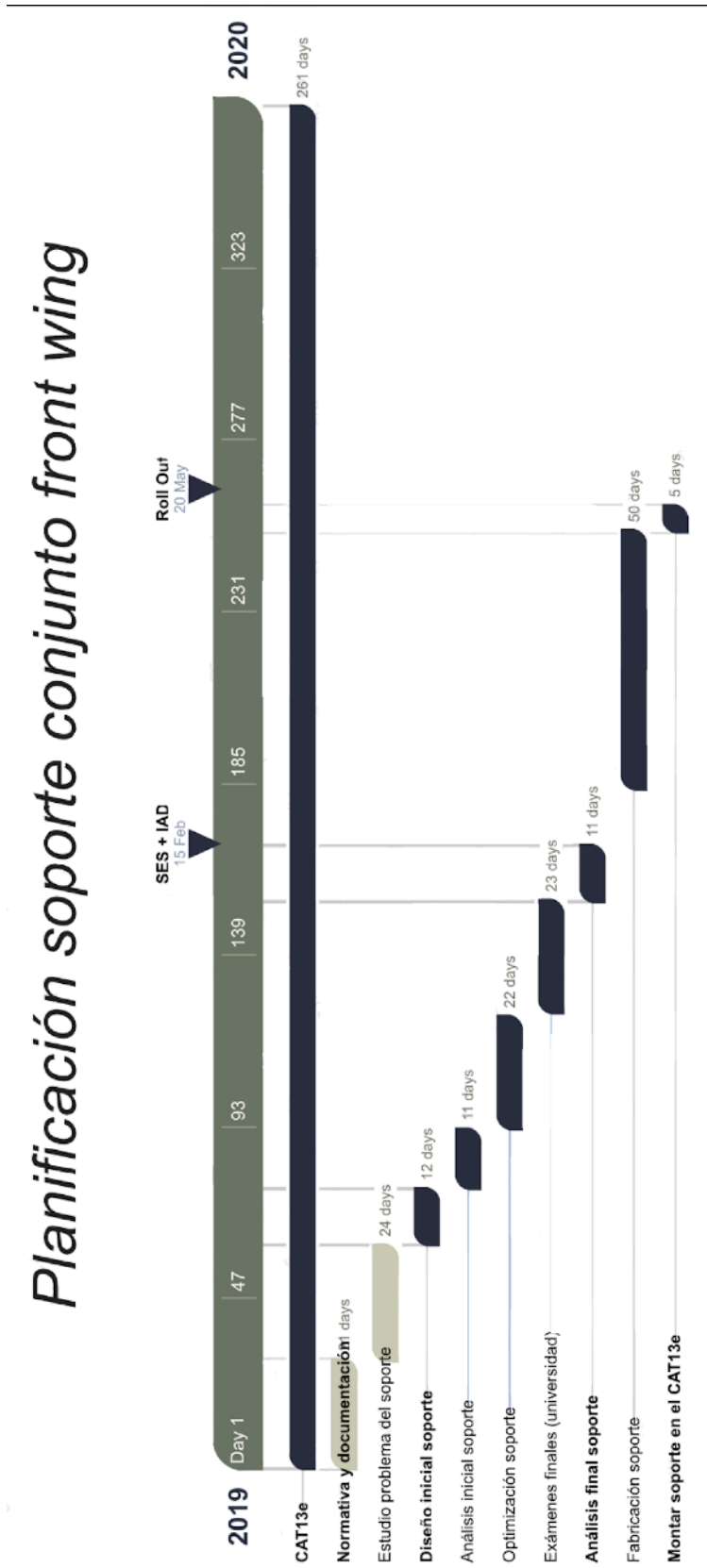


DIAGRAMA 16-1: DIAGRAMA DE GANTT CON FECHAS APROXIMADAS PARA EL PROCESO DE DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL SOPORTE DEL CONJUNTO *FRONT WING*

CONCLUSIONES

Después de completar el trabajo y analizar los resultados se puede afirmar que el objetivo principal del trabajo se ha cumplido. El análisis estructural del ensamblaje *front wing* se ha llevado a cabo y se ha rediseñado el soporte del conjunto *front wing* optimizando el soporte.

El método de análisis para el conjunto se ha realizado de forma ordenada y ha permitido un buen resultado final.

La optimización topológica del soporte del conjunto *front wing* se ha podido realizar cumpliendo con la normativa de FSG y con los requisitos mecánicos que sufre el componente durante el uso del monoplaza. Se ha reducido el peso del soporte, mejorando así la relación peso/potencia del monoplaza.

Se ha realizado un documento que permite a los futuros miembros del equipo tener un punto de referencia en el proceso de análisis y rediseño de un componente mediante el uso de la optimización topológica.

Sería ideal poder validar los resultados obtenidos por simulación con ensayos en el laboratorio de resistencia de materiales pero por desgracia, dadas las circunstancias actuales, no se ha podido fabricar el componente y no se ha podido instalar en el monoplaza CAT13e.

Además hubiese estado de gran valor poder medir las frecuencias de resonancia del conjunto entero para analizar a qué velocidad el conjunto sufriría los mayores esfuerzos.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar me gustaría agradecer a mi familia por el apoyo que me han proporcionado durante estos dos últimos años. Además en estos tiempos tan complicados me han proporcionado un apoyo incondicional que ha sido crucial para poder seguir trabajando y seguir adelante.

También me gustaría agradecer a la compañía Altair por el soporte mediante las licencias proporcionadas que nos permiten usar los programas de simulación que son críticos para la realización de este proyecto.

Quiero agradecer al departamento de resistencia de materiales por la ayuda y consejos proporcionados, especialmente a Xavier Ayneto y Francisco Roure.

También agradecer a Francesc Joaquim por su ayuda en la realización de los múltiples ensayos que le pedimos a menudo y que nos ayuda a realizar.

Finalmente agradecer al equipo ETSEIB Motorsport por los últimos dos años que me han proporcionado con una experiencia única. En especial me gustaría agradecer a los miembros del departamento de Body, concretamente a Javi, Sandro, Albert, Carlos, Núria, Pol, Miquel, Marc Pont, Marc Ruzafa y Óscar .



BIBLIOGRAFÍA

Referencias Bibliográficas

- [1] Formula Student Germany, *Formula Student Rules*, [https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2020/rules/FS-Rules_2020_V1.0.pdf], 2020
- [2] Joseph Katz, *Aerodynamics of Race Cars*, 2006
- [3] Emmanuel Ugo Enemuoh, *Integrating sustainability with design: case study of bicycle frame*, 2011
- [4] Mark E. Schlesinger, *Aluminum Recycling*, 2014

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

- Forum Formula Student Germany, [<https://www.formulastudent.de/fsg/>], 31 Marzo 2020
- Alustock Aluminium properties [<https://www.alu-stock.es/multimedia/descargas/14/Cap11-Aleaciones-de-aluminio.pdf>]
- Tutorial Composites, [https://altairuniversity.com/wp-content/uploads/2012/08/Tutorial_Composite_Optimization_MG1.pdf], 2012
- Pretensión Manager, [<https://altairuniversity.com/learning-library/pretension-manager/>], 2017
- Altair University, Introduction to Nonlinear Finite Element Analysis Using Optistruct, [https://www.advanced-eng.cz/wp-content/uploads/2019/11/eBook_Nonlinear_FEA.pdf] 2018
- Joaquim Serrat, *Disseny d'un aleró davanter de la Formula Student pel CAT11e*, 2018
- Núria Castells Pàmies, *Impact Attenuator Document*, 2019

Trabajo Final de Máster

Máster Universitario en Ingeniería de Automoción

Diseño, análisis y fabricación del soporte *Front Wing* y conjunto *Front Wing* del CAT13e

ANEXOS

Autor: Baker i Iguaz, Ricard
Director: Roure Fernández, Francisco
Convocatoria: Junio 2020



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



ANEXOS

ANEXO A

Componentes fibra de carbono prepreg

Orden	Tarea	Subtarea	Tiempo estimado
1	Modelo	Cortar madera	6h
2		Pegar maderas + Curado	1 día
3		Fresado (empresa)	1-2 meses
4		Lijar (Pulir)	2 días
5		Aplicar Poliéster + Secado	1 día
6		Lijar	2 días
7		Cortar planchas laterales	2h
8		Taladrar modelo y planchas	2h
9		Encerar modelo (10 capas)	6h
10		Encerar planchas (10 capas)	6h
11		Encerar pasadores (10 capas)	6h
12		Fijar planchas al modelo	2h
13		Encajar pasadores	2h
14		Gel Coat+Polvo de aluminio + Curado	1 día
15		Cortar fibra de vidrio (80 g, 3 capes)	2h
16		Laminar fibra de vidrio (80 g, 3 capes)	2h
17		Cortar fibra de vidrio (200 g, 3 capes)	2h
18		Laminar fibra de vidrio (200 g, 3 capes)	2h
19		Cortar fibra de vidrio (600g, 3 capes)	2h
20		Laminar fibra de vidrio (600g, 3 capes)	2h
21		Cortar fibra de vidrio (600g, resta capes)	4h
22		Laminar fibra de vidrio (600g, resta capes)	4h
23		Econo Breaker a todas las esquinas y pasadores	2h

24	Molde	Plastilina a los pasadores	2h
25		Colocar sangrador P21 sobre fibra	1h
26		Colocar malla	2h
27		Preparar tubo de aspiración	2h
28		Preparar tubo de infusión central	1h
29		Colocar tubo de infusión	2h
30		Cubrir tubo de infusión con peel ply	2h
31		Colocar tubo de aspiración	2h
32		Preparar bolsa de vacío	4h
33		Hacer ventana tubo de infusión	2h
34		Preparar bolsa auxiliar	1h
35		Bacío	4h
36		Preparar la mezcla de resina	1h
37		Sacar aire de la mezcla	1h
38		Infusión	3h
39		Curado (8h 60°C)	8h
40		Desmoldar	6h
41		Quitar madera pegada	4h
42		Cortar y pulir esquinas	6h
43		Reparar molde	2 días
44		Pos curar (Datasheet normalerweise 120°C)	4h
45		Reparar molde	2 días
46		Pos curar	4h
47		Cortar fibra plotter (Nexus)	1 día
48		Encerar molde (10 capas) /frekote	6h
49		Encerar pasadores (10 capas)	2h
50		Encajar pasadores	1h
51		Laminar capas de fibra	1h
52		Poner peel-ply	1h

53	Pieza final	Poner sangrador	1h
54		Poner trozo de manta	1h
55		Cerrar molde	1h
56		Envolver molde con manta	1h
57		Preparar bolsa de vacío interior	2h
58		Preparar bolsa de vacío exterior	1h
59		Hacer vacío	2h
60		Curado	8h
61		Desmoldar	4h
62		Sacar bolsa interior, peel-ply, sangrador y manta	2 días
63		Mecanizar	2 días
64		Lijar , pulir	2 días
65		Roscar insertos	1 día
66		Mecanizar insertos passantes	1 día
67		Pegar Insertos 1 lado	1 día
68		Pegar Insertos otro lado	1 día
69		Cortar bloque núcleo Rohacell 51	2 h
70		Fresado núcleo Rohacell 51 (empresa)	1 mes
71		Arenado insertos fibra	1 matí
72		Pegar insertos	2h
73		Laminar encima del inserto	2h
74		Agujerear laminado	1h
75		Roscar inserto	1h
76		Pegar costillas	2 día
77		Repasar acabado	1 día
78		Aplicar MPP	1 día

Endplates

Orden	Tarea	Subtarea	Tiempo estimado
1	Modelo	Cortar maderas	6h
2		Pegar maderas + Curado	1 día
3		Fresado (empresa)	1-2 meses
4		Lijar (Pulir)	1 días
5		Aplicar Poliéster + Secado	1 día
6		Lijar	1 días
7		Encerar modelo (10 capas)	6h
8		Encerar pasadores (10 capas)	6h
9		Encajar pasadores	2h
10	Pieza final	Cortar fibra seca	1 día
11		Cortar núcleo Rohacell 51 y/o Nomex	2h
12		Mecanizar insertos pasantes	1 día
13		Laminar capas de fibra	1h
14		Poner sangrador	1h
15		Poner trozo de manta	1h
16		Envolver el modelo de manta	1h
17		Preparar bolsa de bacío exterior	1h
18		Hacer vacío	2h
19		Curar	8h
20		Desmoldar	4h
21		Mecanizar	4 días
22		Lijar, pulir	2 días
23		Aplicar MPP	1 día